Aus dem physiologischen Institut München
Vorstand: Professor Dr. Brömser

Der Wirkungsgrad bei Muskelarbeit – Theorien, Versuche und praktische Folgerungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und
einer Hohen Medizinischen Fakultät der Bayerischen
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Ellen Gollnow
aus Stettin

Spezialbetrieb für Dissertationsdruck von Robert Noske in Borna-Leipzig
1940

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Bayer. Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Referent: Prof. Dr. med. et phil. A. Hahn

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 1940

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhalt.

Seite

1. Historische Einleitung 1
2. Maßmethoden:
   a) Gasanalyse-Apparate 4
   b) Arbeitsmaschinen 12
3. Untersuchungen am isolierten Muskel 19
4. Vergleichende Versuche an Mensch, Pferd und Hund 22
5. Arbeitsformen der unteren Extremität
   a) Gehen 24
   b) Radfahren 36
6. Arbeitsformen der oberen Extremität
   a) Gewichtheben 43
   b) Kurbelarbeit 45
7. Rationalisierung komplexer Arbeitsvorgänge 48
8. Frauenarbeit 51
9. Sport — Training — Ermüdung 52
10. Neuere Diskussionen über die Definition des Wirkungsgrades . . . 56
11. Schlußbetrachtung 62
12. Literaturangaben 64

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548306_0106

1. Historische Einleitung.

Die Aufstellung des allgemein gültigen Gesetzes von der Erhaltung der Energie durch Robert Meyer (1842) ergab auch die Frage nach der Quelle der Muskelarbeit. Folgende zwei Tatsachen lieferten den Beweis für die Stoffwechselerhöhung bei mechanischer Arbeit:

1. Stärkerer Nahrungsbedarf,
2. größere Sauerstoffaufnahme (um 1800 von Lavoisier entdeckt, von Smith durch zahlreiche Gasanalysen bestätigt).

Also mußte der Stoffwechsel die Quelle der mechanischen Arbeitsenergie sein. — Nun war die Frage zu klären: In welchem Verhältnis sich die drei Hauptnahrungsfaktoren an der Muskelenergielieferung beteiligten. Liebig vertrat 1850 die Ansicht, daß allein das Eiweiß die Kraftquelle darstelle. Viele Autoren unternahmen zahlreiche Untersuchungen. Pettenkofer und Voit[1]), Fick und Wislicenius[2]), Krummacher[3]) wie auch Ph. A. Shaffer[4]) kamen schließlich zu dem eindeutigen Ergebnis, daß der Eiweißstoffwechsel bei genügendem Kohlehydrat- und Fettvorrat von der Muskelarbeit nicht direkt beeinflußt wird. So sagt Pettenkofer: „Aus den Arbeitsversuchen wird vor allem die Tatsache über allem Zweifel erhaben, daß die Stickstoffausscheidung, also auch die Eiweißzersetzung trotz intensiver Tätigkeit des Körpers sich nicht steigert.“ Zahlreiche Versuche liegen vor: Bei Hunger und mittlerer Kost, für die eigentliche Arbeitszeit und auch die folgende Ruhezeit.

Ehe wir jetzt auf den Wirkungsgrad selbst eingehen, sind noch zwei exogene Faktoren mit indirektem Einfluß auf die Muskelarbeit zu erwähnen, da sie bei exakten Versuchen zur Vermeidung von Fehlern stets mitberücksichtigt werden müssen. Es sind dies

Diät sowie Temperatur und Feuchtigkeit der Luft. Die spezifisch-dynamische Wirkung der Nahrungsstoffe macht sich beim Arbeitsvorgang in folgender Weise geltend: Bei überwiegender Rohrzuckerkost wird mechanische Arbeit leichter ausgeführt als bei starker Eiweißnahrung, erstmalig beobachtet von Rubner[5]). 1937 berichtet Atzler[6]) über die physiologischen Grundlagen der leistungssteigernden Wirkung des Traubenzuckers. Bei der Eiweißverdauung verstärkt die zusätzliche Wärmeentwicklung die Sekretion der Schweißdrüsen und beeinträchtigt die Muskeltätigkeit. Die praktische Folgerung hieraus läßt bei hohen körperlichen Leistungen, z. B. Sportwettkämpfen, eine kohlehydratreiche Diät am angebrachtesten erscheinen[7]).

Der Muskel des homoiothermen Organismus reagiert also mit Leistungsminderung auf Temperatursteigerung. Eben war diese Temperaturveränderung durch die spezifisch-dynamische Eiweißwirkung gegeben. Genau so gut kann sie auch in der Lufttemperatur liegen, die dann vor allem bei gleichzeitigem hohen Feuchtigkeitsgrad die physikalische Wärmeregulation des Körpers besonders erschwert. Drittens liegen die gleichen arbeitseinschränkenden Bedingungen noch bei Personen mit reichlichem Unterhautfettgewebe vor, das dann seinerseits Wärmestauung erzeugt. Siehe: Abgestufte Arbeitsversuche mit mageren und adipösen Personen bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Feuchtigkeitsgraden v. Broden und Wolpert[8]).

Um die Mitte des vorigen Jahrhunderts befaßten sich vor allem zwei Physiker mit der Wärmedynamik und dem mechanischen Wärmeäquivalent: Clausius und Hirn. Beide griffen sie auch in diesem Zusammenhang das Problem des Wirkungsgrades auf. Clausius[9]) definierte den Wirkungsgrad einer technischen Kraftmaschine (seinen sogenannten ökonomischen Koeffizienten) folgendermaßen:

$$W = \frac{A}{Q}$$

A = innerhalb gewisser Zeit geleistete Arbeit,
Q = die der Maschine innerhalb dieser Zeit zugeführte Energie.

Hirn[10]) befaßte sich theoretisch und experimentell mit dem Wirkungsgrad des menschlichen Körpers bei Muskelarbeit. Analog der Definition von Clausius verstand er hierunter das Verhältnis von geleisteter Arbeit zur vom Körper während dieser Zeit durch Stoffwechsel aufgebrachten Energiemenge. Seine Originalgleichung lautete:

$$r = \frac{\frac{\text{mkg Arbeit}}{425}}{Q + \frac{\text{mkg Arbeit}}{425}}$$

Auf Grund des mechanischen Wärmeäquivalentes (1 kcal = 426,9 mkg) führte er durch entsprechende Division die mkg-Größe in die Kalorieneinheit über.

Q = der im Kalorimeter bestimmte Wärmeverlust des Körpers durch Strahlung, Erwärmung der ausgeatmeten Luft, Verdunstung usw.

Die Ermittlung des kalorischen Sauerstoffwertes (1 l eingeatmeter Sauerstoff produziert durch Stoffwechselvorgänge im Mittel 5 Kalorien Wärme) vereinfachte dann Bestimmungsmethoden und Gleichung des Wirkungsgrades:

$$W = \frac{\text{mkg Arbeit} : 427 \text{ (Wärmeäquivalent)}}{O_2 \text{ Verbrauch} \cdot 5 \text{ (kalorischer Faktor)}}$$

Eine große Streitfrage blieb bestehen: Ob man nämlich die für den Ruhestoffwechsel notwendige Kalorienmenge (Q_1) vom Nennerwert subtrahieren müsse, um den eigentlichen Wirkungsgrad für die Arbeit zu bestimmen. Denn der Mensch braucht ja im Gegensatz zur Maschine auch bei völliger Arbeitsruhe eine bestimmte Energiemenge zur Unterhaltung seiner Lebensfunktonen und Bedingungen (Atem-, Darm- und Drüsentätigkeit, sowie Körpertemperatur). Beide Formen blieben nebeneinander bestehen. Als 1. Roh- und 2. Reinnutzeffekt:

$$W_1 = \frac{A}{Q} \qquad W_2 = \frac{A}{Q - Q_1}$$

Bezüglich des Ruhestoffwechsels warf Rubner[11]) dann die berechtigte Frage auf, ob nicht die Muskeltätigkeit durch ihre gleichzeitige Wärmeentwicklung die chemische Wärmeregulation des ruhenden Körpers kompensiere und ausschalte, so daß also bei Arbeitsleistung der zu subtrahierende Ruhestoffwechsel um die Kalorien der chemischen Wärmeregulation verringert werden müßte. — Ferner bildet der Ruhewert insofern eine variable Größe, als sich für ihn verschiedene Zahlen ergeben, je nachdem er bestimmt wird bei Hunger, gemischter Kost oder einseitiger Diät, im Liegen, Sitzen oder Stehen (s. Tabelle S. 25). Ein anderes Diskussionsmoment stellt der sogenannte Leerlauf-Energieverbrauch dar, den man noch außer den Ruhekalorien bei der Reinnutzeffektberechnung vom Gesamternergieverbrauch subtrahieren kann. Ein anschauliches Beispiel für die Leerlaufarbeit ist die Beinbewegung am unbelasteten Fahrradergometer. Nach Feststellung der Tatsache, daß längere Zeit über die Dauer des eigentlichen Arbeitsvorganges hinausgehend eine stärkere O_2-Aufnahme stattfindet, wurde die Frage der O_2-Nachatmungsbestimmung und ihre Einbeziehung in den Arbeitsenergieverbrauch heftig diskutiert. Hill stellte die sogenannte Sauerstoffschuld-Theorie auf. Er gab eine Darstellung der Erholung in Form seiner „Verbrauchskurve". Kurz und gut, wir sehen, so eindeutig die Grunddefinition scheint, so viele ungeklärte Momente ergeben sich bei näherer theoretischer Betrachtung der einzelnen Faktoren.

2. Maßmethoden.

a) Gasanalyse-Apparate.

Zur Ausführung entsprechender Versuche bedarf es einer möglichst exakten Bestimmung der Zähler- und Nennergrößen des Nutzeffektkoeffizienten mittels entsprechender Apparate. Diese wurden in großer Zahl erfunden und in verschiedensten Variationen konstruiert. Durch Lavoisiers Entdeckung der gesteigerten O_2-Auf-

nahme bei Arbeit wurden zunächst die Gasanalyseapparate entwickelt.

Lavoisiers Versuchsanordnung zur Respirationsbestimmung
(Faksimile der Gattin Lavoisiers)[12])

Je nach der Versuchsdauer verwendet man verschiedene Auffangvorrichtungen der Exspirationsluft:

1. die Exspirationskammer (bei 24 Stundenbestimmungen),
2. Mundstück, Maske oder Trachealkanüle (bei kurzdauernden Versuchen).

Absolute Dichtigkeit des Gesamtsystems ist Voraussetzung für jeden exakten Versuch. Hierbei spielen die Ventile eine besondere Rolle, und dies hat zur Entwicklung zahlreicher auf verschiedenen Prinzipien beruhender Ventile geführt: die drei Hauptgruppen sind Ventile mit

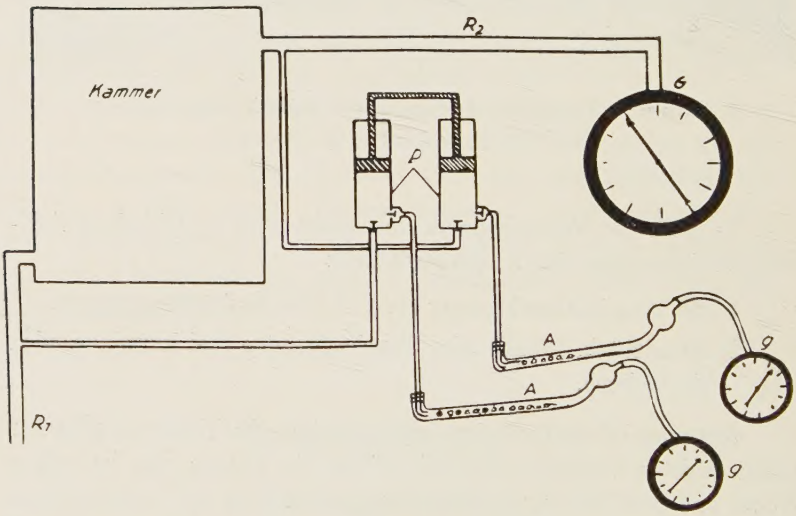
a) Flüssigkeits-,
b) dehnbarem und
c) starrem Verschluß.

Die Analyse der Exspirationsluft kann im sogenannten offenen oder geschlossenen System erfolgen. Die vier gebräuchlichsten Analyse-Apparate seien hier kurz beschrieben. Alle gehen sie im Prinzip auf die Ideen von Lavoisier zurück.

Auffangen der Respirationsluft:
- a) in Respirationskammer
- b) durch direkten Anschluß an die Atemwege mittels
  - α) Mundstück
  - β) Maske
  - γ) Trachealkanüle

	Offenes System	Geschloss. System
a)	Pettenkofer-Apparat	Regnault-Reiser-Apparat
b)	Douglas Sack-Apparat	Benedict-Apparat

1. Pettenkofer-Respirationsapparat[13]).



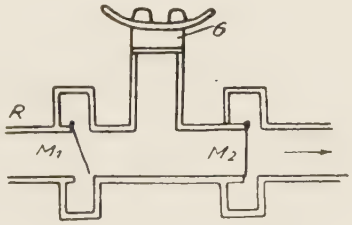
In der luftdichten geräumigen Kammer befindet sich das Versuchindividuum. Die Kammer steht durch ein Rohr (R_1) mit der Außenluft in Verbindung. Ein zweites Rohr (R_2) führt zu einer großen Gasuhr (G), die durch einen Motor in Rotation versetzt wird. Dadurch saugt die Gasuhr eine bestimmte, an ihrem Zähl-

werk ablesbare Luftmenge aus der Kammer, wofür frische Luft durch die andere Röhre einströmt. Durch den Motor, der die Gasuhr dreht, wird eine kleine Pumpe (P) betätigt. Diese entnimmt bei jeder Umdrehung der Gasuhrachse eine Probe der in die Kammer einströmenden und aus dieser abgesaugten Luft und treibt sie durch je ein Analyserohr (A) und durch eine kleine Gasuhr (g). In dem Analyserohr wird der CO_2-Gehalt, in der Gasuhr das Volumen der Luftproben bestimmt. Man liest also an der großen Gasuhr die gesamte Luftmenge ab, die durch die Kammer gegangen ist. Das Analysensystem orientiert uns über den CO_2-Gehalt des dem Volumen nach bekannten Teilstromes. Wir können somit die CO_2-Menge berechnen, die von dem Versuchsobjekt produziert worden ist.

2. Apparat von Regnault und Reiset[14]).

Von den beiden Autoren wurde das Prinzip ausgearbeitet: Der Apparat besteht aus einer absolut luftdichten Kammer für das Versuchsobjekt mit Vorrichtung zur Absorption der Kohlensäure und zum Ersatz des verbrauchten Sauerstoffs (Berechnungen siehe bei Beschreibung des Benedict-Apparates S. 10). Apparate für Versuche am Menschen und an größeren Tieren wurden konstruiert nach Reiset, Hoppe und Seyler, Adwater und Benedict. Dies Verfahren ermöglicht eine besonders genaue Bestimmung des verbrauchten Sauerstoffs.

Jetzt kommen wir zu den Apparaten, bei denen die Exspirationsluft direkt aufgefangen wird. Beim Versuch am Menschen findet vor allem das Mundstück[15]) Verwendung. Dies wurde ursprünglich für Taucher konstruiert.



Es besteht aus einer ovalen Kautschukplatte mit einem Loch in der Mitte, in dem ein Metallrohr sitzt. Die Versuchsperson nimmt die Kautschukplatte zwischen Wange und Zahnreihe, gleichzeitig wird die Nase durch eine Klemme verschlossen. Der Längsschnitt der Metallröhre hat T-Form. An jedem Ende des Querbalkens befindet sich ein Ventil, und zwar an dem Schenkel, durch den die Einatmungsluft passiert, ein Saugventil (M_1), am anderen ein Druckventil (M_2) für die Ausatmungsluft. Masken werden heute im allgemeinen weniger verwendet. Über neuere Maskenversuche am narkotisierten Hund mit elektrischer Muskelreizung siehe Knipping und Rona[16]). Die ungestörteste Atmung garantiert die Trachealkanüle, die daher am häufigsten bei Tieren Verwendung findet. Sie erweist sich auch gerade beim Hunde, bei dem infolge Fehlens der Hautschweißdrüsen nur durch Atmen mit heraushängender Zunge eine physikalische Wärmeregulation möglich ist, als zweckmäßig. Bei den Apparaten mit Atmung durch Mundstück, Masken oder Trachealkanüle gibt es ebenfalls das offene und das geschlossene System.

3. Douglas-Sack-Methode[17]).

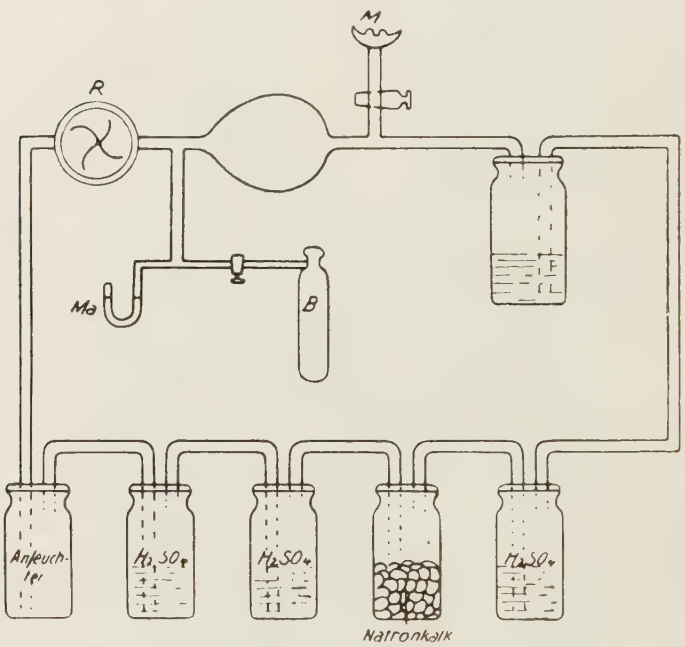
Eingeatmet wird die Außenluft, die ausgeatmete Luft wird in einen Gummisack aufgesammelt (Fassungsvermögen ca 100 l). Der Sack wird durch einen Dreiweghahn verschlossen. Nach Beendigung des Respirationsversuches mißt man die Exspirationsluft und prüft sie in folgender Weise auf ihren Gehalt an O_2 und CO_2. Durch Absorption der Kohlensäure mittels Kalilauge läßt sich ihre Menge bestimmen. Den Sauerstoff der Exspirationsluft kann man dann durch alkalische Pyrogallollösung binden. Näheres über die Analyse siehe Abderhalden[18]).

Hier sei noch kurz der 1887 von Zuntz konstruierte Tornister-Apparat[19]) erwähnt. Er arbeitet im Prinzip ähnlich wie der vorher beschriebene, doch wird in ihm nur ein aliquoter Teil der genau gemessenen Exspirationsluft gesammelt. Die Versuchsperson trägt den Apparat selbst auf dem Rücken. Er ist also gedacht für

Tornister-Apparat von Zuntz.

Respirationsversuche mit freier Ortsveränderung, wie dies vor allem beim normalen Gehen oder Steigen im Gebirge der Fall ist. Als neueste Konstruktion liegt ein von Kofranyi und Michaelis beschriebener tragbarer Apparat vor[20]).

4. Benedictscher Respirationsapparat[21]).



Die Versuchsperson atmet lediglich mit der in den Röhren kreisenden Luft, die mittels einer Rotationspumpe (R) in dauernder Bewegung gehalten wird. Die Luft zirkuliert durch Schwefelsäure, die den Wasserdampf absorbiert, sowie durch Natronkalk, der das Kohlendioxyd aufnimmt. Neben CO_2 und Wasserdampf verschwindet in dem zirkulierenden Luftquantum auch allmählich der Sauerstoff. Das in dem Röhrensystem enthaltene Luftvolumen nimmt also mit zunehmender Versuchsdauer ab, was

man durch ein Manometer (Ma) an dem Absinken des Druckes beobachten kann. Um die Versuchsperson vor O_2-Mangel zu schützen, läßt man aus einer Bombe (B) durch eine Gasuhr in passenden Zeitabständen in das Röhrensystem des Apparates die nötige O_2-Menge nachströmen. Läßt man so viel Sauerstoff einströmen, daß das Manometer zu Beginn und am Ende des Versuches den gleichen Druck anzeigt, daß also zu diesen Zeitpunkten in dem Apparat das gleiche Luftvolumen enthalten ist, so kann man den verbrauchten Sauerstoff unmittelbar an der Gasuhr ablesen. Die ausgeatmete Kohlensäure ermittelt man durch die Feststellung der Gewichtszunahme, welche die Natronkalkflasche im Verlauf des Versuches aufweist. Wird der Energieverbrauch allein aus der CO_2-Ausscheidung bestimmt, so ist das Ergebnis ungenau, da der kalorische Wert für die drei Hauptgruppen organischen Brennmaterials bei Kohlensäure in viel weiteren Grenzen schwankt als beim Sauerstoff. Es wird daher beim Versuch im Pettenkofer-Apparat meist eine gleichzeitige Bestimmung der Stickstoffabgabe durch den Harn und daraus auch der auf den Eiweißstoffwechsel entfallende O_2-Verbrauch bestimmt. Eine direkte Messung der gesamten Wärmeabgabe des Körpers läßt sich im Kalorimeter durchführen. Sie ist sehr kompliziert. Durch zahlreiche Parallelversuche von direkter und indirekter Kalorienbestimmung haben Rubner (am Tier) sowie Atwater und Benedict (am Menschen) eine fast genaue Übereinstimmung beider Resultate bewiesen und damit der viel einfacheren Methode der Gaswechselbestimmung (indirekte Kalorimetrie) den unbedingten Vorrang gegeben.

Wie wir eingangs sahen, steht im Zähler der Nutzeffektformel das mechanische Wärmeäquivalent. Es sind also jetzt noch die Apparate zur Messung der Arbeitsleistung zu besprechen. Hier ergibt sich die Einteilung in die Arbeitsmaschinen für die untere und obere Extremität.

b) Arbeitsmaschinen

für die untere und obere Extremität.

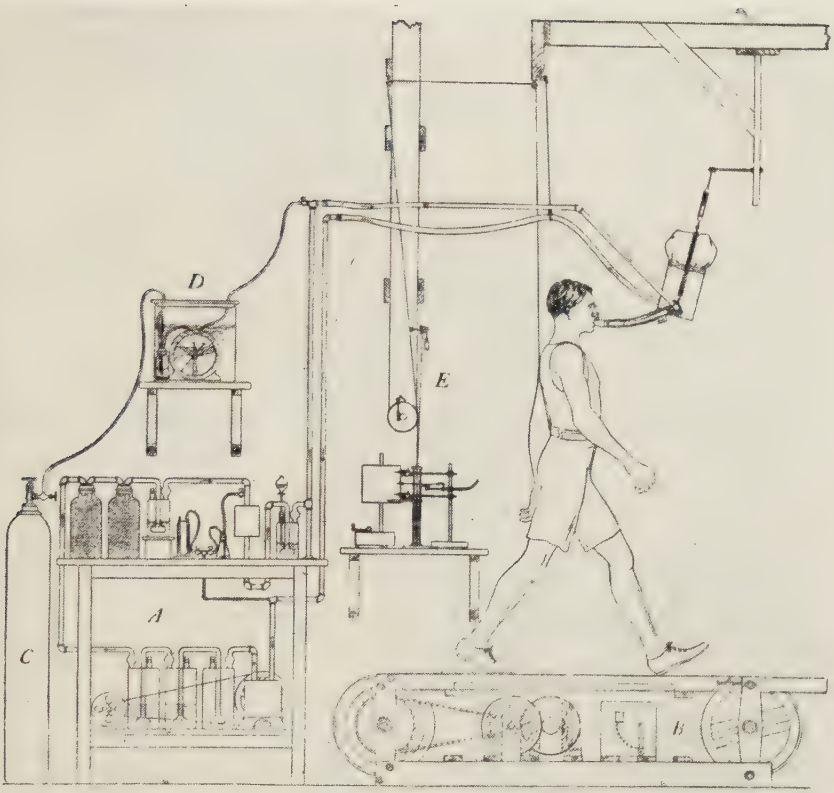
I. Arbeitsmaschinen für die untere Extremität.

1. Tretrad von Hirn[10]).

Die älteste Maschine auf diesem Gebiet ist wohl das Tretrad von Hirn. 1865 gibt uns der Erfinder folgende kurze Beschreibung: „In der einen Ecke des Kalorimeters befindet sich ein Holzrad, dessen Achse von einem Motor außerhalb der Kammer einen gleichmäßigen Bewegungsimpuls in der einen oder anderen Richtung erhält. Während des Versuches geht die Person auf den Brettern des Rades in Höhe der Achse, und sie geht abwärts oder aufwärts mit der Geschwindigkeit des Radumfanges. Die Tourenzahl wird durch einen Zähler registriert, und so weiß man, zu welcher Höhe das Körpergewicht erhoben oder gesenkt worden ist. Das Produkt aus Gewicht und Höhe ergibt die geleistete Arbeit.“ Ein ähnliches Prinzip zeigen Treträder, die früher zur Bewegung von Maschinen benutzt wurden. Auch Voit und Chauveaud stellten Versuche mit derartigen Rädern an.

2. Tretbahn von Zuntz und Lehmann[24]).

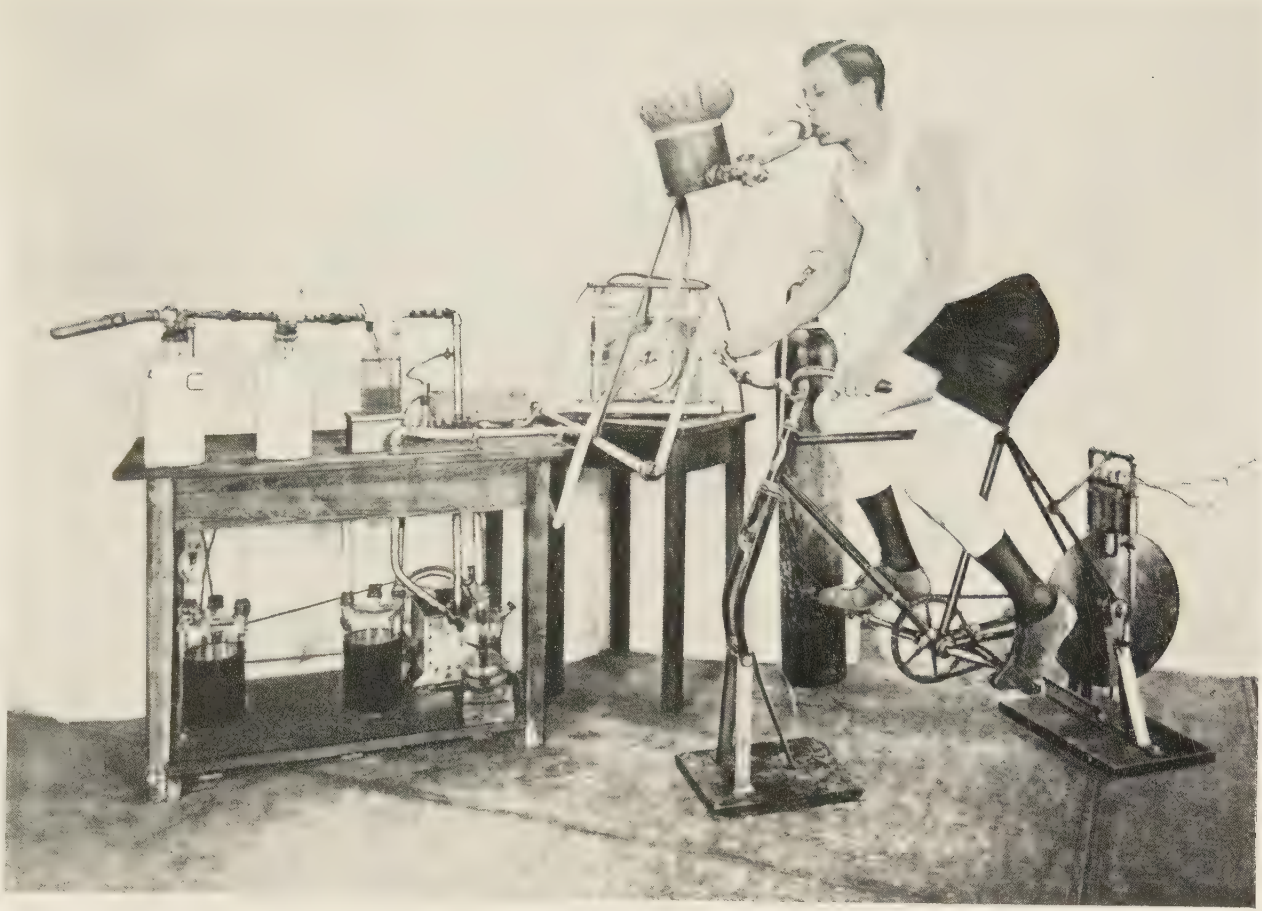
1889 beschrieben Zuntz und Lehmann ihre neue Konstruktion der Tretbahn: Der Mensch oder das Tier bewegt sich auf der Fläche einer Ellipse. Die Bahn wird durch einen Motor bewegt, der an einem Triebrad angreift. Dieses ist durch eine Achse mit einem Zahnrad verbunden, welches die Glieder der Tretbahn faßt. Die Neigung der Bahn läßt sich beliebig verändern und damit jede Variation des Steigungsgrades erzielen. Durch Verbindung der Versuchsperson mit Gewichten mittels eines über eine Rolle laufenden Drahtseiles kann auch Zugarbeit geleistet werden. Es ist also mittels dieser Tretbahn die Messung jeder Gangart des belasteten und unbelasteten Individuums sowie Zugarbeit möglich.



Tretbahn von Zuntz.

3. Stationäres und gebremstes Fahrrad von Atwater und Benedict[25]).

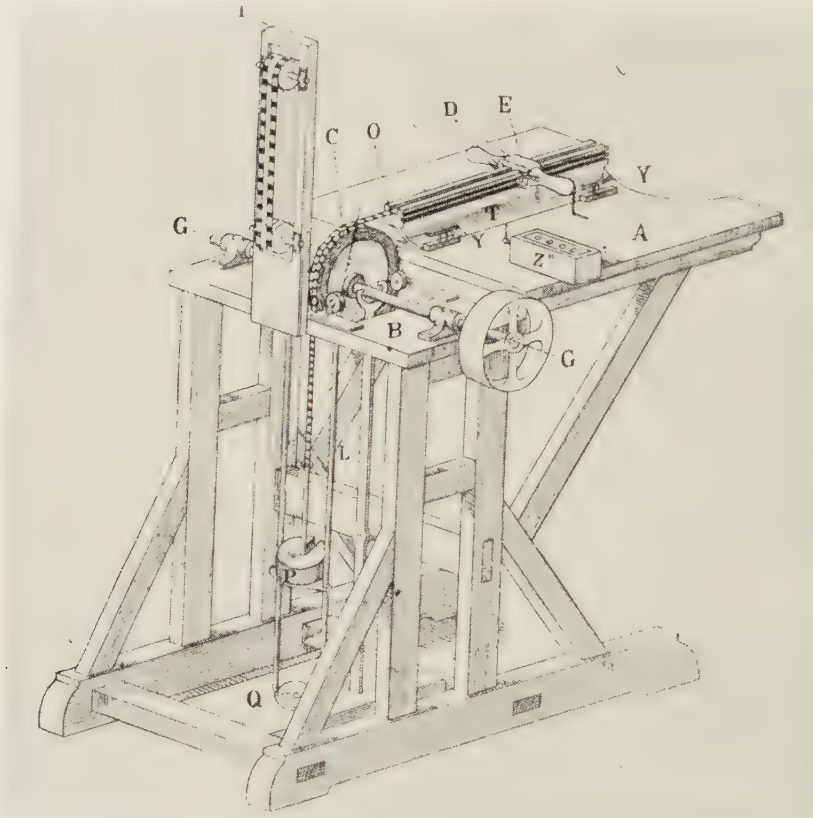
Bekanntlich bestimmt man die am rotierenden System geleistete äußere Arbeit aus der Reibungsarbeit. Die in üblicher Weise von den Pedalen mit Hilfe einer Kette angetriebene Hinterachse des Fahrrades trägt eine Kupferscheibe, die sich in einem Holzrahmen bewegt. An diesem Holzrahmen ist ein Elektromagnet eingebaut, durch dessen Drahtwindungen Ströme von abstufbarer Stärke hindurchgeschickt werden können. In der Kupferscheibe entstehen die sogenannten Foucaultschen Wirbelströme, welche eine hemmende Wirkung auf die Rotation ausüben, die um so stärker ausfällt, je stärker der Magnetismus und je schneller die Umdrehung ist. Durch Eichung im Respirationskalorimeter wird für verschiedene Geschwindigkeiten und die verschiedenen Stromstärken in der Magnetspule die Wärmeentwicklung bestimmt, so daß man die Arbeit, die der das Fahrrad antreibende Mensch leistet, direkt in Kalorien ausdrücken kann.



II. Arbeitsmaschinen für die obere Extremität.

Zwei Arbeitsformen kommen hier hauptsächlich in Frage: Das Heben und das Drehen.

1. Arbeitsapparat nach Johanssen[26]).



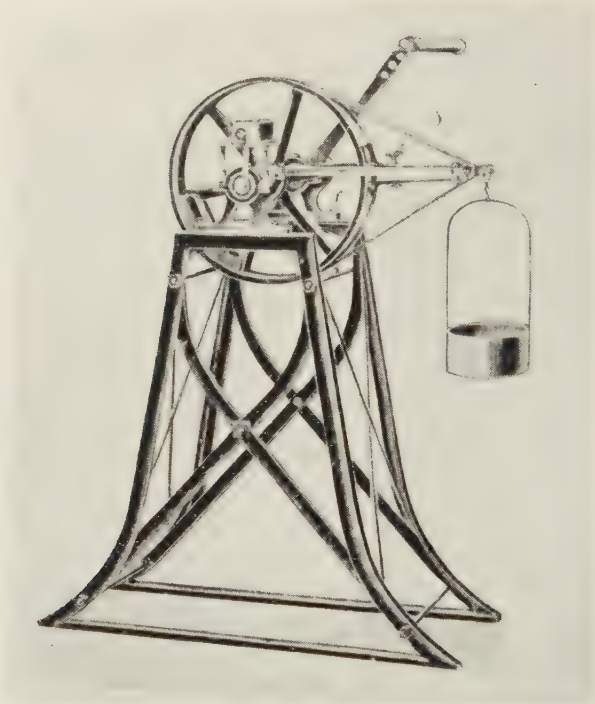
Die zahlenmäßig am einfachsten erfaßbare Arbeit mit der oberen Extremität besteht im Heben von Gewichten (A = Gewicht × Hubhöhe). Annähernd richtige Arbeitsresultate erhält man,

wenn man Gewichte — etwa in Form von Hanteln — aus freier Hand hebt und das Senken der Gewichte durch einen Gehilfen besorgen läßt, denn auch beim langsamen Senken der Gewichte muß zum Abbremsen des Falles eine erhebliche Muskelarbeit aufgewendet werden. Der vollkommenste Apparat für die Hebearbeit ist der von Johanssen angegebene. Er gestattet die weitgehendsten Variationen in bezug auf Hubhöhe und Größe des zu hebenden Gewichtes. Ferner ermöglicht er ausschließliche Hebung und ausschließliche Senkung des Gewichtes durch den Experimentator, während die Maschine die entgegengesetzte Wirkung selbsttätig leistet. Auch die Geschwindigkeit wird aufs genaueste kontrolliert. Ebenso ermöglicht er Gewichte eine beliebig lange Zeit durch Muskelkraft in der Schwebe zu halten (statischer Energieverbrauch).

2. Ergometer nach Zuntz[27]).

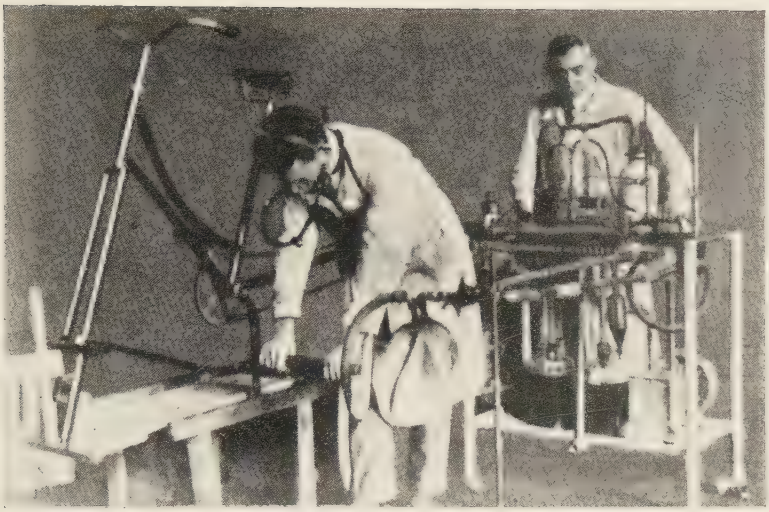
Das erste Modell eines durch Kurbel drehbaren Bremsrades war der Gärtnersche Ergostat. Er ähnelte stark den zu Heilzwecken verwandten Übungsapparaten. Die Ungenauigkeit der Arbeitsbestimmung lag hier in der stark variierenden Größe der Reibung des Bremsbandes. Zuntz konstruierte daher 1899 einen Ergometer mit automatischer Regelung einer konstanten Reibungsgröße: Zur Bremsung dient ein das Rad umgebendes Metallband, welches sich in zwei horizontale Eisenbarren fortsetzt. Diese können durch eine Schraube einander mehr oder weniger genähert und dadurch die Spannung des Bremsbandes geändert werden. Das Ende der Eisenbarren trägt eine Wagschale, welche mit Gewichten beliebig belastet werden kann. Wenn man dann die Schraube so einstellt, daß das Gewicht bei der Umdrehung in horizontaler Stellung schwebend gehalten wird, so hält die Arbeit des Drehens dem Zuge des Gewichtes genau das Gleichgewicht. Die bei einer Umdrehung geleistete Arbeit ist also gleich dem Zuge des Gewichtes incl. Wagschale und den dieselbe tragenden Eisenteilen, multipliziert mit dem Wege, welchen dieses Gewicht zurücklegen würde, wenn es die Um-

drehung mitmachte. Nennen wir den Abstand der Wagschale von der Drehachse = a, das ziehende Gewicht incl. dem Moment der Eisenteile = p, so ist die Arbeit einer Umdrehung = $2 a p \pi$.



Das im vorletzten Abschnitt erwähnte Fahrradergometer wird in geringer Abwandlung auch bei Armarbeit verwendet [28]).

Leider führt es im Rahmen dieser Arbeit zu weit, die zahlreichen Verbesserungen, Vereinfachungen und Neuerungen sowohl der Respirationsapparate als auch der Arbeitsmaschinen aufzuzählen, über die laufend in der „Arbeitsphysiologie“ und anderen physiologischen Zeitschriften berichtet wird.



3. Untersuchungen am isolierten Muskel.

Neben den uns hauptsächlich interessierenden Versuchen am lebenden Organismus unter Anwendung der eben beschriebenen Apparate werden auch ständig Untersuchungen am isolierten Muskel vorgenommen. Fick hat wohl als erster systematische Arbeit auf diesem Gebiete geleistet, und seine Ergebnisse in den klassischen „Myothermischen Untersuchungen" 1889 niedergelegt. Darin taucht die Bezeichnung „Kraftutilisation des Muskels" für den Wirkungsgrad auf. Als Versuchsobjekt dienen die Beinmuskeln des Frosches. Am Kautschuk wurden bereits damals vergleichende Untersuchungen angestellt, die man auch heute noch durchführt. Mit Hilfe einer Thermosäule nimmt Fick eine direkte Bestimmung der entwickelten Wärme vor. Seine Wirkungsgrade liegen zwischen 6—44%. Danilewski[29]) äußerte die Ansicht, daß K.-U. auch 50% übersteigen könnte. Man ersieht aus seinen Tabellen, daß mit

steigender Belastung die Wärmebildung des Muskels wächst, gleichzeitig aber auch die Arbeitsleistung, und zwar rascher als erstere. Der Wirkungsgrad nimmt daher mit der Belastung zu bis zum Arbeitsmaximum. Wird schließlich eine isometrische Zuckung ausgeführt, wobei die der Zusammenziehung sich widersetzende Kraft so groß ist, daß sie nicht überwunden werden kann, so wird der Wirkungsgrad gleich Null. Für die variierte Reizstärke findet Danilewski bei einmaliger Zuckung auf geringen Reiz eine Utilisation der Spannkräfte von rd. 33%, bei stärkeren Reizen nur 25%.

1919 gibt K. Bürker[30]) einen eingehenden Bericht über seine thermodynamischen Versuche. Er kommt zu dem Endergebnis: Die Aduktoren (Semimembranosus und Gracilis) und der Gastrocnemius verhalten sich in thermodynamischer Beziehung ganz verschieden, indem die ersteren bei geringem Energieaufwand mechanisch mehr zu leisten vermögen als der letztere, also einen größeren Wirkungsgrad erreichen, aber leichter ermüden. Dieses verschiedene Verhalten ist auch auf qualitative Verschiedenheiten des anatomischen Substrats (Faserdicke, -länge, Färbbarkeit) und der Funktion (einfacher und gefiederter Aufbau) zurückzuführen. Was die energiespendende Substanz dieser chemodynamischen Maschine betrifft, so steht diese offenbar dem Gastrocnemius in größerer Menge zur Verfügung, als den Aduktoren. Zu relativen Zahlenwerten für den Gesamtenergievorrat gelangt Hill durch einfache Spannungsmessungen an bis zur Erschöpfung tetanisierten Muskeln.

1928 findet sich in Pflügers Archiv ein Aufsatz von E. Fischer[31]) über die Wärmebildung des Skelettmuskels bei indirekter und direkter Reizung sowie bei Reflexzuckung mit Angaben zahlreicher Versuche. Er gelangt zu den Folgerungen: Für den ausgeschnittenen Muskel ist bisher immer ein wesentlich geringerer Wirkungsgrad gefunden worden, als sich aus dem O_2-Verbrauch der Gesamtorganismen bei Arbeitsleistung berechnen läßt. Nun werden in vorliegender Arbeit folgende Nachweise erbracht.

1. Der Wirkungsgrad des ausgeschnittenen Muskels wird wesentlich verbessert durch Reizung vom Nerven aus an

Stelle der sonst üblichen direkten Reize. (Die ökonomischere Wirkung der indirekten Reizung wird durch Schädigung der Muskelsubstanz infolge der elektrischen Durchströmung der Muskelfasern bei direkter Reizung zu erklären versucht.)

2. Der Wirkungsgrad kann weiter verbessert werden durch Summation submaximaler Reizung. Es wird durch auf einen starken Reiz nachfolgende schwache Reize ein besonders hoher Nutzeffekt erzielt. Über die Innervation und Kontraktionsvorgänge im Organismus wissen wir, daß die Muskelbewegungen keine maximalen sind und daß die Größe der Aktionsströme stark variiert. Aus letzterem schließt man auf abwechselnd stärkere und schwächere Erregungen (salvenförmige Innervation).

Die eben aufgezählten Versuchsergebnisse einerseits und die Gesetzmäßigkeit der Organismusvorgänge anderseits besagen, daß der Wirkungsgrad des isolierten Muskels wesentlich verbessert werden kann, indem man die physiologische Art der Reizung möglichst naturgetreu nachahmt. Ein zahlenmäßiges Erfassen ist zur Zeit wegen der Verschiedenheit der zu vergleichenden Umstände noch nicht möglich.

1930 erscheint ein weiterer Artikel von Fischer[32]). Hierin untersucht er das Verhalten des Wirkungsgrades bei der Erscheinung der Treppe. Mit zunehmender Zuckungszahl nimmt auch der Wirkungsgrad zu, bis er auf der Höhe der Treppe einen optimalen Wert erreicht. Für das Verhalten des Wirkungsgrades ist es gleichgültig, ob die Spannungskurven eine „echte Treppe", „einleitende Zuckungen" oder eine „umgekehrte Treppe" erkennen lassen. Die Herstellung der optimalen Bedingungen bei der Treppe zeigt eine größere Abhängigkeit von der Zeit, die seit der ersten Zuckung verstrichen ist als von der erfolgten Zuckungszahl. Die Wiederherstellung des ursprünglichen unökonomischen Muskelzustandes erfordert eine relativ lange Ruhepause, die durch Auswaschen des Muskels nicht wesentlich verkürzt wird. Diese Ergebnisse am isolierten Kaltblütermuskel stehen in einer überraschenden Überein-

stimmung mit Versuchsresultaten, die von Simon und Hebestreit[33]) bei menschlichen, im Organismus arbeitenden Muskeln gefunden wurden.

4. Vergleichende Versuche an Mensch, Pferd und Hund[34]).

Energie-Verbrauch verschiedener Wesen für gleiche Arbeitsleistung.

Versuchsobjekt	Arbeitendes Gewicht	Energieverbrauch in mkg für			Minutenweg bei der Horizontalbewegung	Anstieg der Bahn bei den Steigversuchen in Prozent des Weges
		Horizontalbewegg.		1 mkg Steigarbeit		
		von 1 kg um 1 m	von $K^1/_3$ um 1 m			
Hund (Minimalwert) .	26,9	0,495	—	2,954	78,57	17,2
Hund (Maximalwert) .	26.9	0,501	1,501	3,259		
Pferd	456,8	0,137	1,058	2,912	78,57	10,3
Mensch: K. . . .	55,5	0,334	1,274	2,857	74,48	9,6—13,3
„ P. . . .	72,9	0,217	0,907	3,190	71,32	6,5
„ B. . . .	67,9	0,211	0,861	3,140	71,46	
„ N. Z. . .	80,0	0.288	1,241	3,563	51,23	30,7—62,0
„ S. . . .	88,2	0,263	1,171	3,555	42,34	
„ A. L. . .	72,6	0,284	1,185	2,913	62,04	
„ J. L. . .	81,1	0,231	1,000	2,921	60,90	23,0—30,5
„ L. Z. . .	80,0	0,244	1,051	2,729	56,54	
F. (norm. Gang) .	86,5	0.219	0,974	2,746	66,94	23,3
„ (langs. Gang) .	—	0,233	1,029		35,92	
R. (norm. Gang) .	65,8	0.230	0.930	2,846	63,95	
„ (langs. Gang) .	—	0,251	1,014		34,58	

Versuche zur Nutzeffektberechnung wurden vorgenommen am Menschen, Pferd und Hund. Die Bedeutung der beiden letzteren liegt hauptsächlich im Sinne eines Vergleiches mit den beim Menschen festgestellten Verhältnissen. Hierbei ergaben sich folgende Tatsachen: Die bei Steigarbeit durch das Heben des eigenen Körpers geleistete mechanische Arbeit wird bei den verschiedenen Versuchsobjekten nahezu mit demselben Nutzeffekt (ca. 33%) ausgeführt. Sehr unterschiedlich scheinen sich dagegen die für horizontale Bewegung ermittelten Werte bei den verschiedenen

Arten zu verhalten. Der Hund braucht für die Bewegung der gleichen Leibesmasse fast 4 mal so viel Energie als das Pferd; der Mensch steht in der Mitte. Als nur Versuche am Menschen und Pferd vorlagen, glaubte Zuntz, daß der Kalorienmehrverbrauch auf Kosten des aufrechten Ganges beim Menschen zu setzen sei. Nach den beim Hund angestellten Versuchen, die einen noch höheren Kalorienverbrauch für die Horizontalbewegung ergaben, führte schließlich eine mechanische Analyse der einzelnen Leistungen beim Gehen zur Erkenntnis, daß das kleinere Tier mehr Energie braucht um dasselbe Gewicht in der Zeiteinheit gleich weit zu befördern. Slowtzoff[35]) und v. Hoeßlin[36]) sind der Auffassung, daß der Energieverbrauch für die Horizontalbewegung dem Ausdruck $K^{2/3}$ (K = Körpergewicht) annähernd proportional ist. $K^{2/3}$ entspricht der Körperoberfläche. Nach dieser Berechnungsweise sind die Abweichungen der Werte von Mensch und Pferd für die Horizontalbewegung nur ganz gering. Daß der Hund auch jetzt noch höhere Zahlen aufweist, hat einen anderen Grund: der Hund braucht nämlich zum bloßen Stehen einen größeren Energieverbrauch als Mensch und Pferd. (Hund beim Stehen 41% des Ruhestoffwechsels, Mensch beim bequemen Stehen einige Prozent, Stehen in militärischer Haltung 22% des Ruhestoffwechsels.) Die Ursache hierfür liegt im anatomischen Bau des Bewegungsapparates. Das Stehen erfordert bekanntlich einen statischen Energieverbrauch, der der Kraft des eigenen Schwerpunktes, der beim Stehen über den Tiefstpunkt der Ruhelage gehoben ist, das Gleichgewicht halten muß. Während nun Mensch und Pferd hauptsächlich mit Hilfe ihres passiven Bewegungsapparates (Knochen, Gelenke und Bänder) diese statische Leistung vollbringen, beansprucht der Hund ständig aktive Muskelkraft, um beim Stehen das Durchknicken der Gelenke zu verhindern. Zwei tägliche Beobachtungen verdeutlichen diese Unterschiede. Ein Pferd kann selbst mit schwerer Last lange Zeit stehen ohne Ermüdungserscheinungen zu zeigen. Dagegen beobachten wir bei einem sich selbst überlassenen Hunde, daß er binnen kurzer Zeit aus zweckmäßiger instinktiver Gewohnheit die Bauchlage einnimmt. Wir gelangen also schließlich auch beim Hunde auf

der gleichen Nutzeffektwert für horizontale Bewegung, wenn wir den Reinnutzeffekt berechnen und dabei für den Ruhewert die beim Stehen verbrauchte Kalorienmenge abziehen. Diese kurze vergleichende Betrachtung gibt einen kleinen Begriff von den engen Beziehungen zwischen den gegebenen anatomischen Verhältnissen und ihren Auswirkungen auf den Nutzeffekt.

5. Arbeitsformen der unteren Extremität.

a) Gehen.

Die zahlreichsten und eingehendsten Untersuchungen am Menschen sind begreiflicherweise über das Gehen angestellt worden. Betrachten wir zunächst die anatomischen und mechanischen Verhältnisse, deren große Bedeutung wir eben erkannten. Man unterscheidet das aktive Stand- oder Stützbein und das passive Schwingbein, das mit einem Pendel vergleichbar ist. O. Fischer gibt mit Hilfe seines photogrammetrischen Verfahrens eine genaue mechanische Analyse des Ganges und eine exakte Berechnung der dabei geleisteten mechanischen Arbeit. Indem er den Körper in 12 einzelne, gegeneinander bewegliche Abschnitte teilt, faßt er ihn als ein System von freibeweglichen Massen auf, die durch Schwerkraft, Effektivkraft und Muskelkraft bewegt werden. Dieses im Grunde richtige Verfahren ist leider äußerst kompliziert und daher schwer durchführbar. Daß der Körper bei horizontalem Gehen Hubarbeit leistet, zeigt die Bahn des oszillierenden Schwerpunktes. Nach Weber[37]) leistet ein Mann von 70 kg Gewicht bei tausend Schritten 2240 mkg Hubarbeit, da der Schwerpunkt bei jedem Schritt um 32 mm gehoben wird. Besonderes Interesse verdient folgende von Benedict und Murschhauser[38]) aufgestellte Tabelle für verschiedene Geschwindigkeiten mit Kalorienverbrauch und Bewegungsstudien.

Geschwindigkeit	Durchschnitt für 1 mkg gcal	Heben des Körpers pro Min. m	Entfernung Min. m	Schrittzahl Min.	Schrittlänge cm	Heben d. Körpers pro Schritt cm
Gehen						
langsam ca. 68 m/min	0,486	2,88	69,3	108,2	64,0	2,66
mittel ca. 111 m/min	0,606	6,69	109,0	130,9	83,3	5,11
schnell ca. 146 m/min	0,907	7,20	144,5	152,4	94,8	5,18
Laufen						
ca. 146,3 m/min	0,739	13,76	147,5	181,9	81,1	7,56

Sehr auffallend ist hier zunächst der geringere Kalorienverbrauch beim Laufen im Vergleich zu dem beim schnellen Gehen, obgleich der Körper beim Laufen fast zweimal so hoch gehoben wird und die Zahl der Schritte für die gleiche Entfernung um 20% größer ist. Andererseits leistet aber der Mensch beim schnellen Gehen eine Menge nutzloser Muskelarbeit durch unfreiwillige starke Armbewegung. Den Beweis für diese Behauptung liefert folgende Zusammenstellung von Lusk[39]), in der er aus der großen Zahl der Ruhevoruntersuchungen von Benedict und Murschhauser die Daten von allgemeinem Interesse gibt.

Stellung	Cal pro Min.
liegend	1.14
sitzend	1.19
stehend in bequemer Haltung	1.25
„ auf Stock gestützt	1.26
„ mit Armen aufgestützt	1.18
„ bei gespannter Aufmerksamkeit . .	1.30
„ mit gleichzeitigen Armbewegungen des Schnellaufs	3.13

Für eine schnelle ökonomische Fortbewegung ist also besonderer Wert auf Einschränkung der Armbewegungen sowie der Hubkomponenten zu legen. Eine allgemeine Erfahrungstatsache sei hier als Beweis für die Hubkomponente beim horizontalen Gang angeführt: Im Bewegungstyp des Radfahrers fehlt diese Hub-

komponente, und er besitzt daher ein äußerst scharfes Empfindungsvermögen für ganz geringe Steigungen des Weges, die der Fußgänger oft gar nicht wahrnimmt.

Rein historische Bedeutung haben die Versuche von Hirn mit seinem Tretrad im Respirationskalorimeter bei direkter Kalorimetrie. Seine Rohwirkungsgradwerte schwanken zwischen 0,167 und 0,394. 1891 gibt Katzenstein[10]) den ersten genauen Bericht über die Gehversuche im Zuntz-Laboratorium mit zahlreichen Versuchsprotokollen, Zusammenstellungen und einer Übersichtstabelle. Er berechnet den

O_2-Verbrauch pro kg/min beim Horizontalgehen

maximal = 0,1682 ccm

minimal = 0,0858 ccm

O_2-Verbrauch pro mkg mechanischer Arbeit beim Steigen

maximal = 1,5036 ccm

minimal = 1,1871 ccm

In der „Physiologie des Marsches" (1901) berücksichtigen Zuntz und Schumburg vor allem die Verhältnisse beim marschierenden Soldaten (durchschnittlicher Wirkungsgrad 33—37%). Eine eindeutige Steigerung des Energieverbrauches (Sinken des Wirkungsgrades) zeigt sich beim schnellen wie auch sehr langsamen Marschtempo, bei stärkerer Belastung, Ermüdung (Sinken bis auf 23%) und Fußschmerzen (Umsatzsteigerung bis zu 45%). Eine Abnahme des Kalorienverbrauches geht mit Übung einher. Ferner werden Ermittlungen über die beste Anbringung des Gepäcks und die beste Gangart mittels Respirationsversuchen angestellt. Ein Vergleich zwischen Transport des eigenen Körpers und Transport des Gepäcks ergibt einen erheblich geringeren Energieaufwand für letzteres. Die Autoren halten eine besondere Prüfung des in der französischen Armee viel geübten Beugeganges (marche en flexion) für notwendig. Sie berechnen bei ihren beiden Versuchspersonen einen durchschnittlichen Kalorienverbrauch für 1 mkg Horizontalgehen von 0,509 gcal und 0,527 gcal.

1914 kommen Bresina und Reichel[41]) auf Grund genauer mathematischer Auswertung ihrer Versuchsresultate zu

folgenden energetischen Verhältnissen bei Variation von Geschwindigkeit und Last für den horizontalen Marsch.

1. Geschwindigkeit 32,8—141,0 m/min.
   Der Umsatz pro kg und m-Weg steigt mit der Geschwindigkeit bis zur Grenze der ökonomischen Maximalgeschwindigkeit (ca. 80 m/min) nicht, dann mit jedem Meter Geschwindigkeitszuwachs um 1,2—1,5% seines jeweiligen Wertes.
2. Last: 3—56 kg.
   Bei mäßiger Geschwindigkeit variiert der Umsatz pro kg und m, in der Weise, daß der Zuschlag für andere Lasten als die optimalen (ca 20 kg) etwa dem Quadrate der Lastdifferenz proportional ist (rd. $^1/_{10\,000}$ der Quadratzahl in Kalorien). Jenseits der ökonomischen Maximalgeschwindigkeit, die für alle Belastungen — mindestens die praktisch in Betracht kommenden — als gleich zu gelten hat, wächst der Umsatz pro kg und m Weg mit arithmetisch wachsender Geschwindigkeit geometrisch, und zwar um so stärker, je größer die Belastung ist. Der Zuwachs pro m Geschwindigkeit beträgt im unbelasteten Zustand rd. 1% des jeweiligen Umsatzwertes, wie wir eben hörten. Diese Zahl erhöht sich mit jedem kg getragener Last um rd. 0,037, so daß bei mittleren Lasten rd. 2%, bei großen Lasten gegen 3% als Zuwachs zu gelten haben. Die Ökonomie des Horizontalmarsches scheint also in zweifacher Weise von der Belastung abhängig: Beim nicht forcierten (ökonomischen) Marsch geht der Mann mit mittleren Lasten (um 20 kg) am sparsamsten, der unbelastete darf aber den Marsch mit dem geringsten Verluste forcieren, während jeder Belastete für höhere Geschwindigkeit mehr büßt.

Vor der Besprechung der anschließend angestellten Steigmarschversuche von Bresina und Reichel sei hier auf Benedicts ausgezeichnete chronologische Zusammenstellung [12]) sämtlicher über den horizontalen Gang durchgeführten Energieuntersuchungen hingewiesen. (Im Auszug beigefügt.)

Author, date of publication, and subject	Condition during walking	Method of measuring respiratory exchange	Kind of wal
Smith, 1859:			
Smith	6 hours after food (?)	Mask for resting; mouthpiece for walking; spirometer carried	Indoors, 11 in each d tion
Gruber, 1891:			
Gruber	5 to 6 hrs. after food	Tube in mouth; absorption apparatus in knapsack carried on breast	In room, b and forth
Katzenstein, 1891:			
Kohansky	With food (?)	Zuntz and Lehmann	Zuntz trea
Krzwy			
Wellnitz			
Zimm			
Sondén and Tigerstedt, 1895:			
F. A. W	With food	Respiration chamber	In chamber
G. J			
L. B			
F			
Schumburg and Zuntz, 1896:			
N. Zuntz	Not stated	Zuntz and Geppert; dry gasmeter on back	Zuntz trea
Schumburg			do
N. Zuntz			In room
A. Loewy, J. Loewy, and L. Zuntz, 1897:			
A. Loewy[7]	do	do	Zuntz tread
J. Loewy[7]			
L. Zuntz[7]			
A. Loewy[8]	A few hours after light, liquid breakfast	do	Small plate front of
J. Loewy[8]			
L. Zuntz[8]			
L. Zuntz, 1899:			
L. Zuntz	Moderate breakfast	Zuntz; wet gas-meter near treadmill	Zuntz trea
Frentzel and Reach, 1901:			
Frentzel	With food	Zuntz	do
Reach			
Zuntz and Schumburg, 1901:			
B	After a light breakfast	Zuntz and Geppert	do
P			
Durig and Zuntz, 1904:			
Durig[11]	Without food (?)	Zuntz and Schumburg; dry gas-meter on back	Free path, doors (?)
Durig[5]			
N. Zuntz[8]			
Durig[13]			
N. Zuntz[13]		do	In hut

Resting value	Average weight moved	Distance per minute		Heat computed per horizontal kilogrammeter	
		Range	Average	Range	Average
	kilos	*meters*	*meters*	*gm-cals*	*gm-cals*
Sitting, 6 hrs. after food	92.08	. . . . .	53.64 80.46	. . . . .	[2]0.407 [2].468
Sitting, 5 to 6 hrs. after food	72.00	. . . . .	54.40 54.40	. . . . .	[3].360 [3].356
Standing, leaning against treadmill; with food (?)	55.53	56.00 — 92.00	74.48	. . . . .	[4].526
	58.00	51.00 — 75.00	61.80	. . . . .	[4].786
	75.16	58.00 — 71.00	63.50	. . . . .	[4].554
	57.30	64.00 — 66.00	65.05	. . . . .	[4].426
Sitting, with food . .	62.73	58.70 — 62.40	60.60	0.506 — 0.506	[5].506
	78.25	. . . . .	50.10	. . . . .	[5].337
	70.09	62.20 — 67.90	65.10	.503 — .427	[5].465
	68.77	. . . . .	32.00	. . . . .	[5].324
Sitting	80.00	. . . . .	51.20	. . . . .	[6].678
	88.20	. . . . .	42.00	. . . . .	[6].616
	80.00	47.80 — 52.40	50.10	[6].606 — .803	[6].718
"Ruhewert"	72.60	61.60 — 62.40	62.00	.635 — .705	.670
Sitting	81.10	59.00 — 62.80	60.90	.511 — .560	.535
. . . do	80.00	54.50 — 59.20	56.40	.446 — .636	.570
Lying, without food .	72.60	61.80 — 70.21	67.10	.651 — .724	.681
	81.10	59.40 — 62.04	60.54	.759 — .877	.821
	80.30	63.21 — 67.33	65.24	.548 — .712	.616
"Ruhewert"	72.94	53.45 — 59.35	56.76	[9].538 — .561	[9].554
		92.41 — 103.40	98.67	[9].621 — .693	[9].653
		135.74 — 145.53	140.11	[9]1.015 — 1.168	[9]1.072
Lying, with food . . .	87.10	57.80 — 80.15	66.94	.442 — .626	.527
		31.39 — 39.91	35.92	.511 — .620	.560
	66.40	60.28 — 66.88	63.95	.507 — .596	.553
		31.58 — 37.23	34.58	.464 — .676	.558
Lying, after light breakfast	67.92	70.66 — 89.21	76.50	. . . . .	[10].527
	72.93	58.21 — 82.38	73.50	. . . . .	[10].509
Lying, without food .	[12]91.80	95.70 — 111 50	99.60	.474 — .571	.527
	[12]73 80	57.34 — 95.42	85.56	.448 — .681	.584
	[12]82.50	78.66 — 80.66	79.93	.574 — .714	.663
. . . . do	[12]74.90	66.26 — 91.59	84.21	.633 — .699	.668
	[12]78.70	60.03 — 66.67	62.86	.742 — .796	.774

Author, date of publication, and subject	Condition during walking	Method of measuring respiratory exchange	Kind of walkin
Brezina and Kolmer[1], 1912 (continued): Brezina	12 hrs. after food, or at least 2 hrs. after cup of sweetened tea	Dry gas-meter carried by assistant in first series of experiments, and in last 3 series; in 2d and 3d series, subject carried meter	Level path ou doors, involing turns
do	do	do	do
do	do	do	do
do	do	do	do
do	do	do	do
Douglas, Haldane, Henderson and Schneider, 1913: Douglas	With food	Douglas bag	Room in lab ratory at O ford; circul path
do	do	do	Railway trac Pike's Pea back and for
do	do	do	Grass track, Oxford, ba and forth
Brezina and Kolmer, 1914: Brezina	1½ hrs. after cup of sweetened tea	Zuntz	Zuntz treadm
Galeotti, Barkan, Giuliani, Higgins, Signorelli, and Viale, 1914:			
Barkan	Without food	Douglas bag	Half indoor half outdoor with a tur (all indoors i bad weather
Higgins		do	
Signorelli		do	
Viale		do	

Resting value	Average weight moved	Distance per minute		Heat computed per horizontal kilogrammeter.	
		Range	Average	Range	Average
	kilos	*meters*	*meters*	*gm-cals*	*gm-cals*
"Erhaltungsumsatz" of 1083 gram-calories	81.60	37.40— 73.30	53.10	0.4709—0.5278	[1].489
	80.80	79.20— 84.20	81.50	.5040— .5411	.520
	81.00	92.80— 94.50	93 40	.6088— .6213	.616
	80.50	105.7	105 70	0.7107	.711
	81.00	118.1	118.10	.9281	.928
	81.00	125.60—129.00	127.30	0.9626—0.9720	.967
. . . . do	91.20	43.50— 77.70	62.00	.4502— 0.5716	[1].506
	91.30	84.60— 94.90	91 00	.5651— .5933	.581
	91.10	104.70—105.10	104 90	.7232— .7982	.761
	92.25	115.80—115.80	115.80	.9121— .9122	.912
. . . . do	103.50	32.80— 74.00	54 80	.4766—0.5883	[1].529
	103.60	86.00— 90.60	88.30	.5439— .6436	.594
	103.20	100.0	100.00	0.7256—	.726
	103.00	111.4	111.40	.9143	.914
. . . . do	112.60	37.00— 76.70	55.00	0.5433—0.6391	[1].577
	113.00	78.10— 82.20	80.20	.5450— .6778	.611
	113.00	89.90— 94.70	92.30	.8143— .8796	.847
. . . . do	123.00	48.60— 68.90	58.80	.5858— .5884	[1].587
	123.00	90.9	90.90	0.7747	.775
Standing, with food .	[2]72.45	[3]52.03— 54.18	[3]53 38	[3]0.366 —0.448	[3].402
	72.77	77.25— 82.88	81.00	.440 —0.490	.460
	73.76	102.73— 107.83	105.95	.523 — .549	.531
	72.73	119.90—121.77	120.97	.638 — .682	.656
	72.78	134.65 —137.87	136.26	.889 — .907	.898
. . . do	[2]70.71	[3]51.77— 54.98	[4]53 64	[3].524 — .607	[3].562
	70.48	77.52— 81.55	79.66	.568 — .634	.600
	70.70	102.73—111.32	108.09	.713 — .862	.789
	70.88	112.67— 116.15	114.53	.768 — .897	.833
	70.89	132.77—132.77	132.77	.919 — .964	.942
. . . do	[3]72.94	[3]52.12— 54.98	[4]53.91	[3].547 — .609	[3].571
	72.59	79.13— 84.50	82.88	.588 — .600	.595
	73.77	105.42—111.58	108.36	.704 — .873	.776
	74.36	120.43— 126.33	123.38	.770 — 1.069	.897
	73.42	130.63—139.48	136.26	.978 —1.126	1.066
"Ruhewert"	71.60	31.00— 51.70	46.10	.50 — .56	[4]0.53
	83.80	51.40— 55.20	53.80	.48 — .56	[1] .50
	93.00	49.40— 52.40	51.10	.42 — .55	[1] .50
	104.00	30.1	30.10	0.51	[4] .51
Lying, without food .	79.30	. . . . .	86.70	0.570 —0.395	[3]0.448
	68.00	. . . . .	65.00	. . . . .	[5] .550
	69.50	. . . . .	86.70	.374 — .398	[6] .386
	78.50	. . . . .	86.70	. . . . .	[7] .375

Benedict und Murschhauser haben alle Ergebnisse auf eine vergleichbare Basis umgerechnet. Danach bewegt sich bei Geschwindigkeiten zwischen 32 m min (Sondén und Tigerstedt (1894) und 177,3 m min (Caspari (1905)) der Kalorienverbrauch für das „horizontale m kg" zwischen 0,308 gcal (Amar 1910) und 1,169 gcal (Caspari 1905). Durch Berechnung für Durchschnittsgeschwindigkeiten (80—90 m min) lassen sich die höheren cal-Werte, die alle bei den größeren Geschwindigkeiten liegen, reduzieren. So ergibt sich ein Verbrauch von 0,3—0,7 cal pro m kg. Diese Spanne schließt den von Durig durch lange Untersuchungen ermittelten Kalorienverbrauch von 0,55 gcal für 1 horizontales m kg ein.

In den Steigmarschuntersuchungen von Bresina und Reichel[5] werden die Steigung zwischen 4,7 und 42%, die Geschwindigkeit zwischen 10,1 und 25,4 m min variiert. Die Höhe des Arbeitsumsatzes pro m Weg und kg Gesamtgewicht ergibt sich zwischen Sin. $\alpha = 0$ und Sin. $\alpha = 0{,}35$ in ausreichender Annäherung als:

$$U_a = U_h + 13 \cdot \sin \cdot 4/3\,\alpha$$

$$U_h = \text{Wegkonstante}$$

$$13 \cdot \sin \cdot 4/3\,\alpha = U_m = \text{Mehrbedarf für Steigung.}$$

Die wichtigsten Folgerungen dieser Feststellung sind: Die Marschgeschwindigkeit ist innerhalb der in vorliegenden Versuchen eingehaltenen Grenzen des Marschtempos ohne Einfluß auf den Umsatz pro m kg. Von der Belastung scheint der Umsatz pro m kg beim Steigmarsch nicht in anderer Weise beeinflußt, als durch die vorher dargestellte Abhängigkeit des Wegumsatzes von der Last bedingt wird. Der Lasteinfluß ändert sich also mit der Steigung nicht sehr wesentlich. Immerhin kommt aber offenbar das Optimum der Last allmählich immer niedriger zu liegen, und die Umsatzverminderung durch hohe Lasten wird allmählich um etwas größer, je steiler der Weg ansteigt. Die in der Gehbewegung enthaltene Hubkomponente wird mit zunehmender Steigung in wachsendem Maße zur Leistung der Hubarbeit nutzbar herangezogen. Der scheinbare Wirkungsgrad des infolge der Steigung ausgerechneten Mehrumsatzes ergibt sich als:

$$"W" = \frac{18}{3\sqrt{\sin \cdot a}}$$

also als stetige Funktion der Steigung. „W" = Verhältniszahl der Hubarbeit zum Arbeitsäquivalent des Mehrumsatzes.

Die Betrachtung des rohen Wirkungsgrades der Steigarbeit lehrt, daß es ein Optimum für den Zweck der Höhengewinnung gibt, das bei rund 20% Steigung liegt. Für die praktische Versuchsberechnung des Kalorienbedarfes bei Steigmarscharbeit ergibt sich als größte Annäherung die Möglichkeit den durchschnittlichen scheinbaren Wirkungsgrad mit 30% anzusetzen. In folgender Tabelle [14]) stellen Bresina und Reichel alle bis dahin vorliegenden vergleichbaren Steigmarschversuche zusammen (siehe Tabelle S. 34 35).

1939 erscheint in der „Arbeitsphysiologie" ein Aufsatz über den Wirkungsgrad beim Bergaufgehen von Margaria (Pavia) [15]). Er berechnet als mechanische Arbeit nur die senkrechte Hebung, d. h. der Wirkungsgrad für Horizontalgehen hat den Wert Null. Margaria erhält so einen optimalen Rein-Nutzeffekt von 25% bei 2—3 std/km, 70 Schritten pro min und einer Schrittlänge von ca. 60 cm. Dieser Wert soll mit dem tatsächlichen maximalen Wirkungsgrad des sich zusammenziehenden Muskels vergleichbar sein. Bei demselben Energieverbrauch ist der Wirkungsgrad um so größer, je kleiner die Ganggeschwindigkeit ist. Bei konstanter Geschwindigkeit steigt der Wirkungsgrad mit Zunahme der geleisteten Arbeit, die unter diesen Umständen durch einen größeren Steigungswinkel erzielt wird, um oberhalb eines bestimmten Wirkungsgrades der Arbeitsleistung wieder abzunehmen.

Bei jedem Neigungswinkel des Bodens wird der optimale Wirkungsgrad bei einem Energieverbrauch von ca. 4,5—5 cal/kg/std unabhängig von der Muskelgeschwindigkeit erreicht. Das ist der Fall für:

4—5 km/std	bei	5%	Steigung
3,5 „	„	10%	„
3 „	„	15%	„

Dieser Optimumwert des Netto-Energieverbrauchs entspricht einem Brutto-Energieverbrauch von ca. 5,5—6 cal/min und 1,21 Sauer-

Vergleich des Ergebnisses aller bisher vorliegenden vergleichbaren Steigmarschversuche.

Autor	Versuchsperson	Zahl der Versuche	sin α	cal pro m u. kg	Anmerkungen
Katzenstein (Arch. f. d. ges. Physiol. **49**)	Kohansky	17	0,0078	0,580	Tretbahn
	„	16	0,1078	1,268	„
	Krzywy	3	0,0203	0,905	„
	„	2	0,1107	1,423	„
	Wellnitz	7	0,0144	0,642	„
	„	8	0,1214	1,298	„
	Zimm	2	0,0250	0,589	„
	„	1	0,1114	1,234	„
Zuntz und Schumburg (Physiol. des Marsches)	P.	9	0,0019	0,524	Tretbahn
	„	8	0,0652	1,000	„
	B.	12	0,0019	0,538	„
	„	8	0,0652	1,015	„
Schumburg und Zuntz (Arch. f. d. ges. Physiol. **63**)	Schumburg	5	0,3081	3,192	Tretbahn
	„	4	0,6215	5,813	Treppe
	Zuntz	5	0,3170	3,324	Tretbahn
	„	4	0,6835	5,760	Treppe
A. Loewy, J. Loewy u. L. Zuntz (Arch. f. d. ges. Physiol. **66**)	A. Loewy	4	0,2360	2,290	Tretbahn
	„	3	0,3208	2,710	„
	„	2	0,3930	3,620	„
	J. Loewy	3	0,2360	2,077	„
	„	4	0,3208	2,780	„
	„	3	0,3930	3,125	„
	L. Zuntz	2	0,2360	2,085	„
	„	4	0,3208	2,575	„
	„	3	0,3930	3,240	„
Frentzel und Reach (Arch. f. d. ges Physiol. **83**)	Frentzel	28	0,2393	2,066	Tretbahn (Fettkost)
	„	35	0,2393	1,980	„ (Kohlenhydrat)
	Reach	24	0,2393	2,119	„ (Fett)
	„	29	0,2393	2,086	„ (Kohlenhydrat)
Zuntz und Mitarbeiter (Höhenklima und Bergwanderungen)	Waldenburg	3	0,1268	1,511	Tretbahn
	„	8	0,2500	2,565	Brienz u. Rothorn
	„	4	0,4500	4,540	Col d'Olen
	Kolmer	8	0,1824	1,763	Tretbahn
	„	17	0,2500	2,226	Brienz u. Rothorn
	Caspari	6	0,1268	1,538	Tretbahn
	„	7	0,2500	2,401	Brienz u. Rothorn
	Müller	4	0,1268	1,382	Tretbahn
	„	2	0,2623	2,709	„
	„	15	0,2500	2,526	Brienz u. Rothorn
	„	4	0,4500	3,417	Col d'Olen
	A. Loewy	7	0,1268	1,535	Tretbahn
	„	15	0,2500	2,573	Brienz u. Rothorn
	Zuntz	10	0,1268	1·374	Tretbahn
	„	6	0,2500	2,284	Brienz u. Rothorn

Autor	Versuchsperson	Zahl der Versuche	sin α	cal pro m u. kg	Anmerkungen
Durig (Arch. f. d. ges. Physiol. 113)	Durig	17	0,2655	2,848	Bilkengrat (vor d. Training)
	„	16	0,2655	2,703	„ (nach „ „)
Durig (Denkschriften d. K. Akad. d. Wiss 86)	Durig	4	0,1640	1,774	Neuwaldegg
	Kolmer	6	0,1640	1,777	„
	Rainer	7	0,1640	1,719	„
	Reichel	6	0,1640	1,795	„
Brezina und Kolmer (diese Arbeit, II. Teil)	Brezina	14	0,0470	0,714	Tretbahn
	„	48	0,0965	1,089	„
	„	50	0,1804	1,817	„
	„	59	0,2787	2,854	„
	„	20	0,5503	3,768	„
	„	4	0,3880	4,895	„
	„	8	0,4200	4,756	„

stoff/min. Man kann daher sagen, daß der maximale Wirkungsgrad beim Menschen unabhängig von der Kontraktionsgeschwindigkeit und der Arbeit, welche die Muskeln leisten, erreicht wird, und lediglich von der Größe der Energieausgabe abhängt. Margaria nimmt an, daß diese Vorstellung auf alle Arbeitsarten oder zum mindesten auf diejenigen ausgedehnt werden kann, welche — wie z. B. das Gehen — eine größere Anzahl von Muskelgruppen betreffen.

Was die Ausführungen über Steigversuche im Gebirge mit den Sonderbedingungen des Höhenklimas betrifft, so kann hier nur hingewiesen werden auf die eingehenden Berichte von Zuntz[46]) und Durig[47]) über ihre beiden Monte Rosa-Expeditionen (1901—1906). Von Fick und Wislicenius stammen die ersten Versuche dieser Art. Ferner unternahm Herxheimer[48]) 1933 eine Jungfrau-Expedition und kam teilweise zu gleichen Ergebnissen wie Bürgi[49]) (1900, Rothorn bei Brienz).

Für die sogenannte negative Steigarbeit — d. h. Bergabgehen — wird bei geringer Neigung eine Energieersparnis gegenüber dem Horizontalgehen gefunden. Bei ca. 10% Neigung entspricht der Energieaufwand dem beim Horizontalgehen. Stärkere Neigungs-

grade erfordern dann einen Kalorienaufwand wie Steigarbeit infolge der notwendigen Bremsarbeit gegen die Schwerkraft.

Im Anschluß an die Steigarbeit seien hier gleich die Untersuchungen über den zweckmäßigsten Bau einer Treppe[50]) angeführt, obgleich sie streng genommen erst später bei den systematischen Rationalisierungsverfahren gebracht werden müßten. Mit Hilfe von Respirationsversuchen wird an einer variablen Treppe die günstigste Treppenform ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, daß die individuellen Unterschiede auch bei recht verschiedenem Körperbau in bezug auf die Optimalbedingungen des Treppenbaues vernachlässigt werden können. Das absolute Optimum liegt bei einer Steigerung von 17 cm und einem Auftritt von 29 cm. In kleineren Häusern findet man häufig aus Gründen der Raumersparnis das unökonomische Maßverhältnis von 20:20 cm.

b) Radfahren.

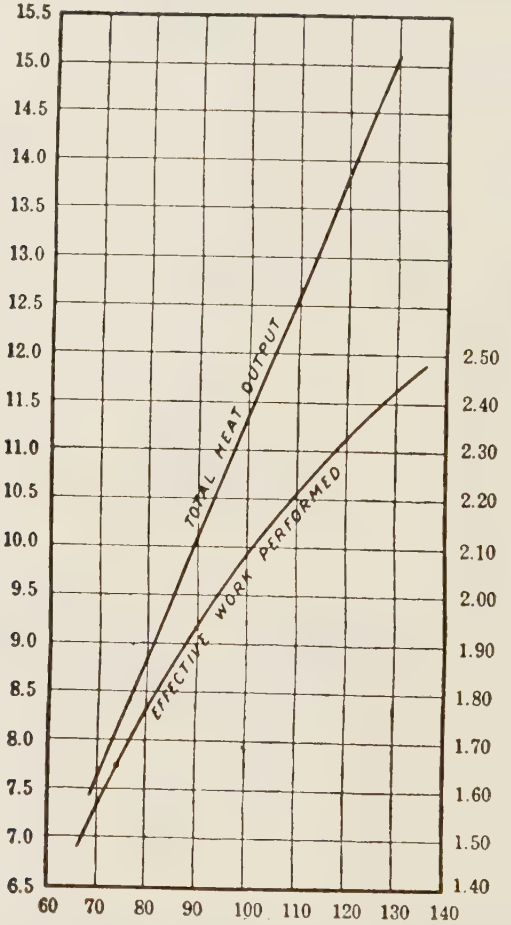
Der andere, genau untersuchte Typ der Beinarbeit ist das Radfahren. Atwater und Benedict waren es, die das „stationary bicycle" erdacht und konstruiert haben. Folgende Tabelle[51]) zeigt ihre ersten Versuchsergebnisse. Der Gesamtenergieverbrauch wurde wie bei Hirn auf dem Wege der direkten Kalorimetrie bestimmt.

Subject and kind of experiment	Duration	Energy katabolized		Heat equivalent of muscular work	Efficiency	
		Total	Excess in work over rest experiments		Net	Gross
Subject, E. O.:	*days.*	*cals.*	*cals.*	*cals.*	*p. ct.*	*p. ct.*
Average of 13 rest experiments . . .	42	2.279	....	. . .	. . .	. . .
Average of 3 work experiments . . .	12	3.892	1.613	214	13.3	5.5
Subject, J. F. S.:						
Average of 4 rest experiments . . .	12	2.119	....	. . .	. . .	. . .
Average of 6 work experiments . . .	18	3.559	1.440	233	16.2	6.6
Subject, J. C. W.:						
Average of 1 rest experiment . . .	4	2.357	....	. . .	. . .	. . .
Minimum of 14 work experiments . . .	46	5.056	2.699	529	19.6	10.5
Maximum of 14 work experiments . .	46	5.332	2.975	601	20.2	11.3
Average of 14 work experiments . . .	46	5.143	2.786	546	19.6	10.6

Die diesem ersten Apparat anhaftenden Mängel stellten sich sehr bald heraus und gaben Veranlassung zur Konstruktion eines verbesserten Ergometers, mit dem Benedict und Carpenter dann folgende Wirkungsgrade[52]) errechneten.

Subject	Heat equivalent of muscular work	Mechanical efficiency	
		Gross	Net
	cals.	*p. ct.*	*p. ct.*
J. C. W., average of 6 days . . .	49	14.5	21.6
B. F. D., average of 3 experiments	45	14.2	21.2
A. L. L., average of 6 days . . .	38	12.7	19.7
A. L. L., extra severe work 1 day	46	14.1	20.8
E. F. S., one day	51	12.8	18.1
N. B., average of 4 experiments .	112	18.1	21.3
N. B., average of 2 experiments .	79	16.8	20.8
Do	65	16.2	21.0
N. B., one experiment	60	15.7	20.7

1913 veröffentlicht das Carnegie-Institut Washington die Zusammenstellung von Benedict und Carpenter über ihre gesamten



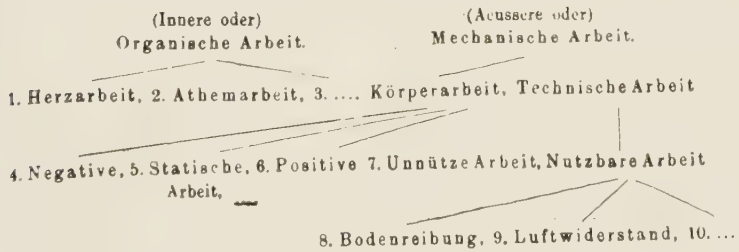
Die Umdrehungszahlen stehen unten, die Wärmeabgabe pro min. links, die während 1 min. erzeugten Arbeitskalorien rechts.

Untersuchungen. Sie bestimmten einen reinen Nutzeffekt von 28—30% beim Radfahren. Auf den Wert von 28% hatten sich

auch Berg, Dubois und Zuntz[53]) 1904 geeinigt. Die beiden oben genannten Forscher erörtern das Problem des Grundumsatzes, der bei reiner Wirknugsgradbestimmung zu subtrahieren ist. Es wird in diesem Zusammenhang die Stoffwechselzunahme gegenüber dem Ruhestoffwechsel beim Sitzen auf einem Stuhl, beim Sitzen auf dem durch Motor angetriebenen Rade und bei der Radfahrbewegung ohne Widerstand bestimmt und anschließend die entsprechende Nutzeffektberechnung durchgeführt. Ferner wird das Verhältnis von Wirkungsgrad und Geschwindigkeit einer genauen Untersuchung unterzogen. In einer graphischen Darstellung bildet bei zunehmender Geschwindigkeit die Verbindungslinie der Punkte für die gesamte Wärmeabgabe des Körpers eine ansteigende Gerade, während der Verlauf der entsprechenden Arbeitskalorienwerte sich als Kurve darstellt. Diese beiden divergierenden Linien veranschaulichen das Absinken des Wirkungsgrades bei zunehmender Geschwindigkeit.

Revolutions per minute	Gross efficiency	Revolutions per minute	Gross efficiency
	p. ct.		*p. ct.*
70	20.6	110	17.6
80	20.0	120	16.9
90	19.2	130	16.1
100	18.4		

Aus der Abhandlung der drei bereits vorher erwähnten Autoren[54]) sind einige Gesichtspunkte von besonderem Interesse. So bringen sie folgende sehr übersichtliche Aufteilung der Gesamtarbeit.



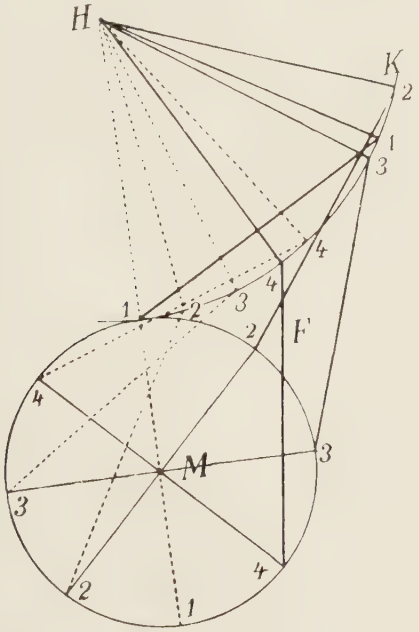
Diese Einteilung läßt sich auf jede beliebige körperliche Arbeit anwenden. Für den speziellen Fall des Radfahrens ist die nutzbare Arbeit derjenige Teil der Arbeit, der ausschließlich zur Vorwärtsbewegung der Maschine dient. Dieser kann nun noch eingeteilt werden nach den verschiedenen Arten des Widerstandes, die er zu überwinden hat. Er zerfällt vornehmlich in die Arbeit, die zur Überwindung der Bodenreibung und des Luftwiderstandes dient. Daneben können noch andere Faktoren, beispielsweise die Beschleunigung bei ungleichmäßiger Geschwindigkeit oder in besonderen Fällen der positive oder negative Einfluß einer geneigten Bahn in Rechnung zu ziehen sein.

„Die körperliche Arbeit" der Beine wird durch folgende graphische Darstellungen [55]) [56]) veranschaulicht (siehe S. 41).

Ein Wort noch über die Haltung des Radfahrers. Es ist unzweckmäßig, wenn die Last des Körpers vorwiegend vom hinteren Rade getragen wird. Bei annähernd gleichmäßiger Lastverteilung auf beide Räder erzielt man eine schnellere und leichtere Fahrt. Abgesehen von verringertem Luftwiderstand bei gebeugter Haltung kommen noch andere Momente für die zu leistende Muskelarbeit in Betracht. Das hohle Kreuz entspannt die Hauptheber des Schenkels (Iliopsoas) und schafft auch für die vom Becken entspringenden Muskeln der Hinterseite des Oberschenkels veränderte, ungünstigere Bedingungen. Die gebeugte Haltung ermöglicht eine viel vollkommenere Federung für Oberkörper und Kopf bei Stößen auf unebener Bahn, und daraus ergibt sich wiederum eine Energieersparnis. Aus diesen Gründen muß der leicht gebeugte Rücken als physiologische und ökonomische Haltung beim Radfahren angesehen werden.

In neueren Untersuchungen über das Radfahren befassen sich Große und Lehmann [58]) mit dem Einfluß der Tretkurbellänge auf Wirkungsgrad und Arbeitsmaximum (Gesamtarbeit bis zur Ermüdung). Drei Kurbellängen werden gewählt: kurz = 14,5, normal = 18, lang = 22 cm. In der Zusammenfassung heißt es: Der Wirkungsgrad ist bei langen und kurzen Tretkurbeln günstiger als bei normalen. Es ist praktisch anzustreben, die Tretkurbellänge ver-

stellbar zu machen, damit jeder Fahrer sie längstmöglich einstellt. Bei höheren Leistungen (Bergfahren, Schnellfahren, Gegenwind)



Bewegungsform der Beine beim Kurbeltreten.

Das eine Bein ist durch ausgezogene Linien, das andere durch punktierte Linien angedeutet. H = Hüftgelenk, K = Knie, F = Fuß, M = Mittelpunkt des Kurbellagers. Die zusammengehörenden Stellungen beider Beine sind durch die Ziffern 1, 2, 3, 4 bezeichnet.

Bahn des Schwerpunktes des Beines bei einer Kurbelumdrehung.

($^1/_4$ der wirklichen Größe.)

So und *Su* Schwerpunktslage bei senkrechter Stellung der Kurbel oben und unten. *Hh* und *Hv* Schwerpunktslage bei horizontaler Stellung der Kurbel vorn und hinten. Ist der Schwerpunkt eines Beines in *So* oder *Hh*, so ist der des anderen in *Su* oder *Hv*.

kann er dadurch seine Leistungsdauer um 50% und den Wirkungsgrad um 17% steigern.

Auch die Sattelstellung[59]) hat einen Einfluß auf den energetischen Haushalt beim Radfahren: Arbeitsmaximum und Wirkungsgrad werden durch erhebliche Vorverlegung über das Tretlager oder Rückverlegung über die Hinterachse des Rades verschlechtert. Mit Zunahme der Sattelhöhe (Abstand der Sattelmitte vom Tretlager) steigt das Arbeitsmaximum bei allen Leistungen. Eine Zunahme der Sattelhöhe um 4—5 cm verdoppelt bereits das Arbeitsmaximum. Der Wirkungsgrad ist dagegen bei einer mittleren Sattelhöhe am größten. Es wird eine Normalhöhe festgelegt, die dann gegeben ist, wenn in aufrechter Haltung bei tiefster Pedalstellung und gestrecktem Bein gerade noch das Pedal mit dem Absatz erreicht wird.

6. Arbeitsformen der oberen Extremität.

Zur Messung der Armarbeit hatten wir zwei verschiedene Arbeitsmethoden kennen gelernt: Einmal werden Gewichte gehoben, mit dem anderen Apparat ist Kurbelarbeit zu leisten.

Amar[60]) machte als Erster aufmerksam auf die Wirkungsgradunterschiede, die zwischen Arm- und Beinarbeit bestehen. Er stellte seinen beim Treppensteigen gefundenen Reinnutzeffekt von 15—30% den von ihm beim Feilen ermittelten Wirkungsgraden von 3—5% gegenüber. Katzenstein[61]) hat diese Tatsache bereits 1891 etwas weniger präzis formuliert, indem er die These aufstellte: „Die mit den Armen durch Raddrehen geleistete Arbeit erfordert einen höheren Stoffwechsel als die durch Gehen und Steigen geleistete.“ Folgende Tabelle, die von Atzler[62]) zur Illustration der Schwankungen des Wirkungsgrades aufgestellt wurde, veranschaulicht gleichzeitig auch recht gut den Unterschied zwischen Arm- und Beinarbeit.

Arbeit	Optimaler Wirkungsgrad %
Gewichtheben	8,4
Feilen	9,4
Hantelstoßen	10,0

Arbeit	Optimaler Wirkungsgrad %
Senkrechtes Hebelstoßen	14,0
Kurbeldrehen	20,0
Radfahren	30,0
Gehen	33,5

a) Gewichtheben.

Die älteste Tradition zeigen die Untersuchungen über das Gewichtheben, denn bereits Lavoisier wählte für seine Respirationsversuche diese Tätigkeit als Arbeitsvorgang. Benedict hat aus jenen Versuchen einen Rohnutzeffekt von 4,4% für die nüchterne Person berechnet, während sich nach dem Essen nur 3,3% ergaben. Die entsprechenden Nettowerte betragen 7,7 und 5,5%. Henriot und Richet[63]) setzten 1887 den reinen Wirkungsgrad beim Gewichtheben auf 11,1 bis 50,3% fest. Den anfangs beschriebenen Arbeitsapparat nach Johanssen benutzt Abramson[64]) 1929 für seine sorgfältigen Energieumsatzbestimmungen bei Muskelarbeit. Mit Hilfe der Kenntnis gewisser Konstanten ermittelt er auf rechnerischem Wege den Energieverbrauch und umgeht so die zeitraubenden und kostspieligen Respirationsversuche. Er stellt für den reinen Muskelenergieumsatz die Gleichung auf:

$$U = k_1 + k_2 \, Tm \, Z + k_3 \, Tm \, r + k_4 \, A$$

k_1 bis k_4 = Konstante
Tm = Durchschnittsspannung im Muskel
Z = Kontraktionszeit
r = mittlerer Verkürzungsgrad unter der Muskelarbeit
l = Verkürzungsstrecke
A = Arbeit = Tm · l

In die Wirkungsgradformel $W = \frac{A}{U}$ eingesetzt, ergibt sich nach Kürzung für

$$W = \frac{1}{\frac{k_1}{A} + \frac{k_2}{l \cdot Z} + \frac{k_3 \cdot r}{l} + k_4}$$

Die Kenntnis gewisser Konstanten genügt um den Energieverbrauch für eine bestimmte, in der Johanssenschen Arbeitsmaschine durchgeführte Arbeit zu berechnen. Will man aber für eine andere Arbeitsform den Energieverbrauch rechnerisch ermitteln, so benötigt man offenbar neben den erwähnten Konstanten genaue Kenntnis der aufgewandten Kräfte und der Zeit ihrer Einwirkung.

Am Ukrainischen Institut in Charkow wurden 1930 Untersuchungen über die optimalen Bedingungen beim Gewichtheben[65]) angestellt in bezug auf Gewicht (= ca. 20 kg), Ausgangshöhe mit Hubhöhe (von 0,5 auf 1,0—1,5 m) und Tempo (12 pro min). Zur Verrichtung derselben Arbeit während gleicher Zeit ist ein großes Gewicht mit langsamem Tempo energetisch vorteilhafter als umgekehrt. Der Quotient der O_2-Schulden, d. h. das Verhältnis des O_2-Defizits zum gesamten spezifischen O_2-Verbrauch ist ungünstig bei Arbeiten, die mit Überanstrengung der Muskeln des Armes und des Schultergürtels verbunden sind im Vergleich zu Leistungen, die unter Teilnahme der dorsolumbalen Muskulatur verrichtet werden.

Das rhythmische Gewichtheben gehört zu den sogenannten diskontinuierlichen Arbeitsformen, d. h. zwischen den einzelnen Cyklen des Bewegungsvorganges liegen Ruhepausen, die sehr verschiedene Länge haben können. Eine kontinuierliche Arbeitsform ist dagegen das Radfahren und Kurbeln. „Bei den diskontinuierlichen, wie auch bei den statisch durchsetzten Arbeitsformen verliert der Wirkungsgrad auf Grund neuester Forschung seine souveräne Bedeutung als Gradmesser für die Zweckmäßigkeit der Arbeitsanordnung“ schreibt Atzler 1939 in den Ergebnissen der Physiologie[66]). Es ist an sich ein naheliegender Gedanke, daß der Mensch die größte Arbeitsmenge (Gesamtarbeit bis zur Ermüdung) bewältigt, wenn er unter dem günstigsten Wirkungsgrad arbeitet. Herbst, Nebuloni und Atzler[67]) hatten auch durch entsprechende Versuche am Fahrradergometer Beweise für diese Annahme geliefert. Nun ergeben aber Versuche aus neuester Zeit (Simonson und Sirker beim Gewichtheben, Fischer an einem besonderen Arm-Ergograph, Große-Lordemann und

Müller am Fahrrad), daß die Größe des Arbeitsmaximums in erster Linie vom Anteil der statischen Arbeit abhängt. Man variiert in diesen Versuchen die Kontraktionsgeschwindigkeit des Muskels. Für die kontinuierliche Arbeit darf man aber im allgemeinen annehmen, daß eine direkte Beziehung zwischen Wirkungsgrad und Arbeitsmaximum besteht, wenn durch optimale Gestaltung der Muskelkontraktion die statische Komponente ausgeschaltet wird.

b) Kurbelarbeit.

Nun bleibt noch die kontinuierliche Arbeit des Kurbelns zu betrachten. In bezug auf die Arbeitsmaschine ist sie eine ausgesprochene Parallelarbeit des Arms zur Beinarbeit am Fahrradergometer. Als Zuntz-Schüler führt Katzenstein[68]) zahlreiche Dreh-Versuche am Zuntz-Ergometer aus. Er bestimmte 1891 einen O_2-Verbrauch von 1,957 ccm im Mittel für 1 mkg mechanischer Arbeit, geleistet durch Drehen. Laulanie[69]) variierte als Erster Geschwindigkeit und Widerstand, und prägte dabei mit der Bestimmung des Wirkungsgrad-Optimums einen Grundbegriff der Arbeitsphysiologie — als anerkannte Optimalzahlen gelten heute 30—35 Umdrehungen. Es blieb die optimale Drehungszahl trotz der Variation der übrigen Bedingungen konstant. So suchte man nach einer Abhängigkeit des Optimums von besonderen Eigenschaften des Muskels. Ein Kräftediagramm ergab ein bestimmtes Druckmaximum und -minimum bei jeder Drehung, und so ließ sich die optimale Kontraktionsdauer wie auch die optimale Pausenlänge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Muskelkontraktionen (= Druckmaximal des Diagramms) bestimmen. Atzler[70]) führt hierzu noch aus: Man begeht keinen großen Fehler, wenn man annimmt, daß die Kurbelarbeit von zwei Muskelsystemen A und B geleistet wird, die zeitlich hintereinander arbeiten. Das erste System A erteilt dem Kurbelgriff in seiner höchsten Lage einen Stoß nach vorne unten, wobei der Rumpf nach vorn geneigt wird. Das andere System B richtet den Rumpf wieder auf. Bei einer unterhalb der optimalen liegenden Drehgeschwindigkeit kommt dem

zweiten System noch die weitere Aufgabe zu, den Kurbelgriff wieder nach oben in die Ausgangshöhe zu bringen. Die Optimalverhältnisse sind also dadurch ausgezeichnet, daß das erste Muskelsystem der Apparatur so viel kinetische Energie zuführt, wie sie gerade für eine Arbeitsperiode, d. h. für eine vollständige Kurbeldrehung notwendig ist. Wie sich aus dem Arbeitsdiagramm ergibt, erstreckt sich diese Druckwirkung des Muskelsystems über einen Winkel von etwa 150°. In der nun folgenden Kurbelperipheriestrecke wird bis etwa 210° keine nennenswerte Arbeit geleistet. Von 210° ab aber beginnt die Rumpfhebung, welche von dem Muskelsystem B ausgeführt wird. Aus der optimalen Umdrehungszahl pro min und dem Kräftediagramm errechnet Atzler dann eine optimale Kontraktionsdauer von 0,7 sec und die dazugehörige optimale Pause von 1 sec. Diese Zahlen decken sich nahezu mit Ergebnissen, die auf ganz anderem Wege gewonnen sind. — Hasse[71]) setzt 1931 die optimale Höhe der Kurbelachse auf H = 1000 fest. Der Kurbelradius r = 400 ist der günstigste. Bei der Wahl eines größeren Kurbelradius verschlechtert sich der Wirkungsgrad schneller als bei einem niedrigen. Der optimale Kurbeldruck (Belastung) liegt bei rund 13 kg, bei geringerem Kurbeldruck verschlechtert sich der Wirkungsgrad schnell, so daß es angebracht erscheint, 12 kg mit dem Kurbeldruck nicht zu unterschreiten.

Einen weiteren wesentlichen Faktor bei der Kurbelarbeit bildet das Trägheitsmoment. Es gewinnt Bedeutung für den Wirkungsgrad, unter dem bei verschiedener Geschwindigkeit gearbeitet wird. Aus dem Arbeitsdiagramm ergibt sich, daß man am günstigsten arbeitet, wenn sich der von der Hand auf die Kurbel ausgeübte Druck auf die günstigste Stelle konzentriert. Dann wird dem System so viel kinetische Energie zugeführt, daß die Kurbel gleichsam wie von selbst wieder zum höchsten Punkt gelangt. Dazu ist es aber erforderlich, daß die lebendige Kraft groß ist im Vergleich zur Arbeitsleistung. Wird also bei gleichbleibender äußerer Arbeitsleistung einmal langsamer, einmal schneller gedreht, so wird man bei niedrigem U einen um so besseren Wirkungsgrad zu erwarten haben, je größer das Trägheitsmoment ist.

Natürlich geht das nur innerhalb gewisser Grenzen. Unterschreitet insonderheit die Trägheit ein bestimmtes Maß, so spielt sie keine wesentliche Rolle mehr für die Ökonomie. Bei Geschwindigkeiten, die oberhalb der optimalen Zone liegen, genügt schon eine relativ geringe Trägheit, um günstige Arbeitsbedingungen zu schaffen. Wird hier dagegen ein hohes Trägheitsmoment gewählt, so verschlechtert sich der Wirkungsgrad offenbar deshalb, weil viel Korrekturarbeit notwendig ist, um die hier besonders schwer zu vermeidenden Unregelmäßigkeiten im Drehen auszugleichen. Ergometrographische Untersuchungen über die Arbeitsleistungen der rechten und der linken Hand bei Rechts- und Linkshändern [72]) zeigen Ergebnisse, die sich ohne weiteres aus der später zu besprechenden Trainingswirkung ergeben. Zum Abschluß der Betrachtung über die Armarbeit sei die Übersichtstabelle von Reach [73]) gegeben.

Reiner Wirkungsgrad beim Arbeiten mit den oberen Extremitäten.

Autor	Art der Arbeit	Pro 1 mkg verbraucht		Wirkungsgrad	Anmerkung
		Cal.	mkg	%	
Katzenstein	Kurbeldrehen	9,2	3,9	25,4	
Sondén u. Tigerstedt	„	9,55	4,05	24,7	
Reach	„	8,5	3,6	27,9	ca. 44 Touren in der Minute
„	„	8,7	3,7	27,2	ca. 49 Touren in der Minute
„	„	9,8	4,15	24,1	ca. 52 Touren in der Minute
Johannson u. Koraen	Gewichte-Heben am Johannsonschen Arbeitsapparat	9,8	4,2	24,0	Der statische Energieumsatz nicht mitgerechnet; siehe Text
Hanriot u. Richet	Gewichte-Heben	16—21	7—9	11—14	Der statische Energieumsatz mitgerechnet

7. Rationalisierung komplexer Arbeitsvorgänge.

Nach Besprechung der relativ einfachen Arbeitsformen kommen wir jetzt zu komplexen Arbeitsvorgängen und ihrer Wirkungsgradbestimmung. Von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgehend wurde im Zuge der Industrialisierung zuerst durch Taylor eine wissenschaftlich exakte Untersuchung und Zergliederung der verschiedenen Arbeitsvorgänge im großen gefordert, denn eine Auswertung der bereits erwähnten Erkenntnis über die großen Wirkungsgradschwankungen bei verschiedenen Arbeitsformen und dann eine in jeder Beziehung optimale Gestaltung dieser günstigen Arbeitsform versprachen große ökonomische Erfolge. Die Forschung erstreckte sich auch auf die Maschinen und Werkzeuge, deren Verbesserung und Normalisierung ebenfalls der Leistungssteigerung des Arbeiters dienen sollte. Das Prinzip derartiger Bestimmungen von Optimal-Konstruktionen für Arbeitsgeräte haben wir schon im Rahmen der Besprechungen über die Arbeit am Fahrrad und Kurbelergometer kennen gelernt. In Deutschland war es dann vor allem Edgar Atzler, der sich ganz diesen Problemen widmete, nur mit etwas anderer Zielsetzung als Taylor. Er strebte Optimalleistung und Rationalisierung an, während Taylors Prinzipien Maximalleistung und Intensivierung waren. Atzler ist der Begründung der Zeitschrift „Arbeitsphysiologie" (1928), die auch bereits den jüngsten Zweig der Muskelarbeit, den Sport, in ihre wissenschaftlichen Untersuchungen einbezieht. Ferner gründete Atzler das Kaiser-Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie in Dortmund-Münster.

In den russischen Spezialinstituten in Moskau, Charkow und Leningrad wird das Problem ebenfalls intensiv bearbeitet, was aus zahlreichen Veröffentlichungen in der „Arbeitsphysiologie" hervorgeht. So wurden hier außerordentlich wirkungsvolle Rationalisierungsprinzipien für die Maurerarbeit [74]) ausgearbeitet. Kagan [75]) und Mitarbeiter verglichen Fließarbeit und freie Arbeit und fanden eine ausgesprochene Energieersparnis bei Verwendung des laufenden Bandes — mit der Ratio-

nalisierung der Arbeit des Formens befaßte sich Simonson 1929[76]). Er maß den Energieaufwand beim Arbeiten mit einem Handstempel, mit einer Zughebelpresse und mit einer hydraulischen Presse. Bei der letzteren fand er den geringsten Kalorienverbrauch pro Arbeitsstück, aber den höchsten pro Zeiteinheit, als Folge der Intensivierung. Damit ist die Gefahr rascher körperlicher Abnutzung gegeben. Bei der Untersuchung der wichtigsten Einzelarbeitselemente erwies sich, abgesehen vom Stampfen, der Kalorienverbrauch am höchsten bei den Nebenarbeiten, z. B. beim Schaufeln. 1930 berichtete Simonson folgendes: An einer neuen Formmaschine wurde das Schaufeln durch eine behelfsmäßige Vorrichtung ersetzt, die den auf das Schaufeln entfallenden Energieverbrauch um $^5/_6$ herabsetzte. 1932 brachte Simonson einen Artikel über Untersuchungen eines rationallen Arbeitsregimes beim maschinellen Formgießen (Verteilung und Dauer von Pause und Arbeitszeit). Bei der günstigsten Variante steigerte sich der Nutzeffekt der Arbeit auf 113 Stück pro Tag gegen 90 Stück in der Periode der anfänglichen Betrachtungen. Allerdings stieg auch der Ausschuß von 10 auf 12 Stück. Der Energieverbrauch betrug durchschnittlich 2,78 cal/min und 5,73 cal für einen halben Formkasten.

Vom Dortmunder Institut liegt eine umfassende Untersuchungsreihe über die Schaufelarbeit[77]) vor. Aus der großen Fülle der Angaben seien hier nur einige instruktive Sätze zitiert: Die äußere Arbeit wird bestimmt, indem ein Lämpchen, welches an der Schaufel befestigt ist, photographiert wird. Der durch das Objektiv gelangende Lichtstrahl wird 186mal pro sec durch eine rotierende Blende unterbrochen. Auf der Platte entsteht das Bild einer Kurve, bestehend aus einzelnen Punkten, aus deren Abstand die Geschwindigkeit der Bewegung berechnet werden kann (Chronocyklographische Aufnahme). Der muskuläre Wirkungsgrad ist im Durchschnitt 4%. Die Leerbewegung wird zu 102 cal, die Haltearbeit zu 11,88 cal/min berechnet. Die Schüttelrutsche darf nicht weiter als 3,5 m von der Abbaustelle entfernt sein. Es zeigt sich, daß gerade die scheinbar günstigste Wurfhöhe von 1 m die unökonomischste Art zu schaufeln ist und daß sowohl darüber, als auch

darunter günstigere Arbeitsformen vorkommen. Die Gründe für diese Erscheinungen — teils physikalisch (ungünstiger Abwurfwinkel) teils physiologisch (anstrengende Körperhaltung und Muskelbewegung) — werden genau erörtert. Die Verwendung eines Schaufelstieles von 66 cm Länge ist um 10% rationeller als ein Schaufelstiel von 19 cm Länge. Damit wird das Thema der Rationalisierung der Arbeitsgeräte angeschlagen. Wir hatten es bereits im Rahmen der Kurbelarbeit und bei den Fahrraduntersuchungen berührt. Auch hier sei nur ein eindrucksvolles Beispiel für viele erläutert.

Im Kaiser-Wilhelm-Institut wurde mit einfachsten Mitteln eine wesentliche Verbesserung am Spaten[78]) angebracht: Beim Einstechen des Spatens in die Erde entsteht bekanntlich ein Reibungswiderstand, der proportional mit der Einstichtiefe wächst.

Kirsch, Lehmann und Vennewald haben nun die Schneide des Spatens derart verbreitert, daß ein scharfkantiger Wulst gebildet wird, der beiderseits etwa 1 mm über die Spatenblattfläche hervorragt. Dieser Wulst schafft beim Eindrücken des Spatens in das lehmige Erdreich einen freien Spalt, indem sich das Spatenblatt nahezu reibungslos vorwärts bewegt. Der Spaten wird deshalb der „freischneidende" genannt. Infolge des leichteren Einstechens geht natürlich die Arbeit mit dem Spaten schneller von der Hand. Die Menge des in der Zeiteinheit bewegten Lehms nimmt um 25% zu, der Kalorienverbrauch bleibt aber gegenüber der Arbeit mit dem altmodischen Spaten nahezu konstant. — In Ungarn wurden eingehende Ermittlungen über den Energieverbrauch beim Ernten[79]) und anderen landwirtschaftlichen Arbeiten erhoben.

Anfügen möchte ich eine Gesamtzusammenstellung der Arbeitsgruppen nach Rubner[80]). Die Gruppierung ist nach der Höhe der „motorischen Kalorien" (für die Arbeit verbrauchte Kalorien) vorgenommen:

Gruppe 1 = Berufe unter 1000 motorischen Kalorien
„ 2 = „ 1000—2000 „ „
„ 3 = „ 2000—3000 „ „
„ 4 = „ über 3000 „ „

Beruf	Gesamtkalorien	Motorische Kalorien	Die motor. Kal. machen in % der Gesamtkal.
Bureauarbeiter	2556	622	24.6
Lithograph	2662	771	28.9
Schneider	2681	796	29.6
Zeichner	2836	928	32.7
Damenschneider	2881	966	33.5
Hauswart	2895	973	33.6
Mechaniker	3199	1247	39.3
Schreiner	3257	1274	38.5
Lasttragen (45 kg)	3370	1409	44.7
Herrenschuster	3447	1461	42.6
Lasttragen (65 kg)	3492	1519	43.5
Sogen. schwere Arbeit	3776	1724	45.6
Heutragen	3910	1898	48.2
Soldat, Manöver	3960	2018	50.9
Last 65 kg bergauf	5012	2120	42.4
Erntearbeit	4388	2279	52.6
Mähen	4836	2846	58.9
Holzfäller	5600	3860	60.0

8. Frauenarbeit.

Vereinzelt finden sich Energieumsatzbestimmungen bei ausgesprochener Frauenarbeit und für die Frau im Beruf. Rubner[51]) gibt folgende Übersicht über den Kalorienverbrauch für verschiedene Hausfrauenarbeiten.

Beruf	Frauenarbeit im Hause (pro 70 kg und 8 Stunden Arbeit)		
	Gesamtkal.	Motor. Kal.	Die motor. Kal. machen in % der Gesamtkal.
Handnähen, Maschinennähen mit Motor	2348	506	21.5
Geschirrwaschen, Maschinennähen ohne Motor, Bügeln	2471	592	28.9
Berufsnäherin	2508	632	25.2
Bodenschrubben	2650	760	28.6
Berufsmäßiges Maschinennähen	2685	792	29.5
Waschen der Wäsche	2721	824	30.2

Vergleich.

Beruf	Gesamtkal.	Motor. Kal.
Ein Schneider	2644	754
Berufsschneiderin	2508	632

Der anschließende Vergleich zwischen Schneider und Schneiderin zeigt keinen Unterschied im Kalorienverbrauch, also dürfte der Wirkungsgrad für Mann und Frau gleich sein. Dagegen liegt das Arbeitsmaximum der Frau für schwerere Arbeit bedeutend niedriger. Über die Scheuerarbeit stellen Weatherhead und Thomson[82]) (Glasgow) eingehende Untersuchungen an und bestimmen mittels eines besonderen Apparates die beim Scheuern geleistete Druck- und Zugarbeit, ferner den Kalorienverbrauch beim Scheuern im Stehen und Knien wie für geübte und ungeübte Versuchspersonen. Aus Japan[83]) stammen neue Untersuchungen über den wöchentlichen Gang der Tagesleistungen bei den Arbeiterinnen. Dabei wurde die beste Leistung der Tagesschicht in der Mitte der Woche gefunden, in der Nachtschicht dagegen am Ende. Für diesen zu den europäischen Erfahrungen in Widerspruch stehenden Befund konnte bisher keine befriedigende Erklärung gegeben werden.

Schließlich befassen sich Schröder und Franz[84]) wie auch Teruoka[85]) mit dem Wirkungsgrad für Muskelarbeit bei Schwangeren. Sie sind geteilter Ansicht. Teroukа stellt besonders in den beiden letzten Monaten ein deutliches Ansteigen des O_2-Verbrauchs (Absinken des Wirkungsgrades) fest, Schröder dagegen nicht. Teroukas Befunde weisen auf die große Abhängigkeit der Funktion des Muskels vom Zustand des übrigen Organismus hin.

9. Sport — Training — Ermüdung.

Im Rahmen der Muskelarbeit kann der Sport nicht unerwähnt bleiben. Von allgemeinem Interesse dürfte folgende Tabelle[86]) der verschiedenen sportlichen Fortbewegungsarten mit den dazugehörigen Geschwindigkeits- und Energiebedarfswerten sein.

Übungsart	Geschwindigkeit m/min	Steigerung des Energiebedarfs in Prozent des Ruheumsatzes	Autor
Strammes Stehen . .	—	26	Widburg
Gehen	48,4	52	Brezina und Kolmer
	148,1	762	
Steigen . . . . . (Neigung 15%)	40	400	Magne
	120	1620	
Radfahren	58,1	183	L. Zuntz
	140,1	870	
Schwimmen	16,1	167	Liljestrand und Stenström
	47,6	832	
Rudern	36,8	136	
	93,4	966	
Laufen	186	669	A. V. Hill
	325	2819	
Skilaufen	131,5	1100	Liljestrand und Stenström
	228	1420	
Schlittschuhlaufen .	203	680	
	342	1170	

Sofort fällt der hohe Kalorienbedarf für das Schwimmen, trotz der minimalen Geschwindigkeit ins Auge. 1905 unternahm Dubois-Raymond[7]) eingehende Studien über die Physiologie des Schwimmens mit folgender Versuchsanordnung: Es wurde ein Ruderboot benutzt, um die Versuchsperson durchs Wasser zu ziehen. Der Widerstand erwies sich als so groß, daß das Boot nach jedem Ruderschlag seine Fahrt fast völlig verlor, so daß die Person stoßweise (genau wie beim Schwimmen) vorwärts gezogen wurde. Es blieb hierbei also nur der Fehler bestehen, daß die Stellung der geschleppten Person von den wechselnden Stellungen eines Schwimmers notwendigerweise verschieden sein mußte, und daß außerdem die Anzahl der Beschleunigungen, die vom Ruderboot erteilt wurden, nur halb so groß war wie die Anzahl der entsprechenden Schwimmstöße. Ein Dynamometer, das mit dem Schleppseil verbunden war, zeigte die geleistete Zugarbeit an: 350 m kg min. Diese Zahl entspricht einer Arbeitsleistung bei mäßig schnellem Gehen.

Das subjektive Gefühl der Anstrengung, wie auch rasch auftretende Ermüdungserscheinungen beim Schwimmen zeigen ohne weiteres, daß die Arbeitsleistung des Körpers weit größer ist. Dubois kam zu folgender Aufstellung:

Nutzbare Arbeit	pro Meter	8 m/kg
Körperliche Arbeit		
Stoß beider Beine	10	„
Anziehen dabei	3	„
Widerstand dabei und dessen Aufhebung	2	„
		23 m/kg

So veranschlagte er die Gesamtarbeit mit 23 m/kg. Dieser Wert fällt in die Größenordnung der Maximalzahlen beim schnellsten Gehen, dessen Anstrengungsempfindungen sich eher mit denen beim Schwimmen decken. Die Muskelarbeit beim Schwimmen ist also sehr bedeutend, außerdem die dabei erforderliche Lungenventilation sehr hoch. 1939 berichtet Karpowitsch[88]) über das Schwimmen folgendes: Der Wirkungsgrad des Schwimmens als eine Form der Fortbewegung wurde bestimmt: Er schwankt beim Crawlen zwischen 0,5% und 0,22%, beim Rückenschwimmen zwischen 0,88% und 1,35%. Formeln für die verschiedenen Arbeitsleistungen beim Schwimmen werden aufgestellt und hierfür besondere Apparate konstruiert zum Messen der Schwimmdauer, der zurückgelegten Strecke, der Beziehungen zwischen diesen beiden Faktoren untereinander, dem Gewicht der Versuchsperson und zu dem Anstieg der vorwärts treibenden Kraft.

Im Zusammenhang mit den Arbeitsbetrachtungen gewinnt das Kugelstoßen als Sportart mit leicht bestimmbarer Arbeitsleistung besondere Beachtung. Hierüber hat Herzog[89]) seine Untersuchungen zur Lehre von der synhaptischen Gliedermechanik angestellt. Interessant ist u. a., daß im Gegensatz zu den Wurfgesetzen beim Kugelstoßen der optimale Abwurfwinkel unter 45° liegt. Herzog stellt am Schluß fest: Derjenige benutzt seinen Bewegungsapparat ökonomisch, der die durch das Wirken der Muskel-

kraft entstehenden physikalischen Kräfte mit in den Kraftbedarf einzurechnen versteht, der also während einer Bewegung nicht dauernd und überall Muskelkräfte einsetzt. Auf diese Weise erreicht sein Bewegungsapparat einen viel höheren Nutzeffekt als der eines „Bewegungslaien".

Gelegenheit zu Sportuntersuchungen auf breiter Basis bezüglich des Untersuchungsmaterials bieten die Olympiaden, sofern das Verfahren nicht zu langwierig und anstrengend für die Versuchsperson ist.

Fischer und Smith[90]) haben eingehende Bewegungsstudien beim Hürdenlaufen betrieben. Mittels eines besonderen Hüftgürtels werden speziell die Bewegungen des Beckens studiert. Der Kurzstreckenlauf ist eine typische Arbeitsform, die fast ausschließlich auf O_2-Schulden geleistet wird.

Das Sportthema führt von selbst zu einer kurzen Betrachtung über die viel umstrittene Trainings- und Ermüdungswirkung. Mit der Übung wie mit der Ermüdung gehen Änderungen im Energieverbrauch für die gleiche Arbeitsleistung einher: Übung setzt den Energieverbrauch herab (Atzler, Henderson, Seppölä, Gemill, Dill, Hellsten), Ermüdung steigert ihn (Atzler, Hill, Simonson). Übung, Training, Einarbeiten sind drei Worte für ein und denselben Grundbegriff. Die Verbesserung des Wirkungsgrades ist zurückzuführen einmal auf ein ausgeglicheneres Zusammenspiel der Muskulatur (Geschicklichkeitstraining) aber auch auf ein ökonomischeres Arbeiten des einzelnen Muskels, allerdings ist das Zentralnervensystem durch die Verbesserung der Koordination stärker an dem Trainingserfolg beteiligt als der einzelne, leistungsfähiger gewordene Muskel (Dill). Man nimmt eine Kapillarisierung und dadurch erhöhte Oxydationsfähigkeit des trainierten Muskels an. Beim Tierversuch kamen am gleichen Tier in der trainierten Muskulatur auf eine Muskelfaser doppelt so viel Kapillarschlingen, als in dem untrainierten Kontrollmuskel. Hiermit stützt Jordi seine konträren Versuchsergebnisse, daß nämlich trainierte Muskeln einen höheren Energieverbrauch für die gleiche Arbeitsleistung benötigen, als untrainierte.

Als Momentantraining ließe sich die Tatsache[91]) bezeichnen, daß sich der Wirkungsgrad körperlicher Arbeit mit zunehmender Arbeitsdauer fortgesetzt verbessert. Der Anstieg verläuft zuerst rapid und verflacht sich allmählich, ist aber selbst bei längeren Versuchszeiten (6—10 Minuten) noch nachweisbar. Die Ursache wird darin gesucht, daß bei kurzer Arbeitsdauer — sei es als Zustandsänderung der Muskulatur oder der Zirkulationsbedingungen — mehr Spaltprodukte entstehen als bei Fortsetzung der Arbeit. Bei Arbeitsleistungen, die durch kurze Pausen getrennt sind, ist bei der nachfolgenden Arbeitsleistung der Wirkungsgrad günstiger als bei der vorhergehenden. Dieser Einfluß verschwindet erst bei Pausen von ca. 30 Minuten Dauer. Bei sehr langen Arbeitszeiten verschlechtert sich der Wirkungsgrad dann wieder, was auf Ermüdung zurückzuführen ist. Dann verschlechtert sich 1. der Wirkungsgrad des Einzelmuskels, und außerdem werden zur Entlastung Hilfsmuskeln herangezogen, die unökonomischer arbeiten. Leider sind nur in den seltensten Fällen Ermüdungsmessungen möglich, außerdem fehlt eine einheitliche Beziehung zwischen Wirkungsgrad und Ermüdung, die eine Bestimmung des Wirkungsgrades auf Grund der Ermüdungsgröße ermöglichen würde.

10. Neuere Diskussionen über die Definition des Wirkungsgrades.

Trotz der allgemeinen Anwendung der Wirkungsgradformel für die unzähligen Versuchsergebnisse wird sie von Zeit zu Zeit angefochten. So bezweifelt Fick 1870 als Erster die Grundlage der Formel, indem er der thermo-dynamischen Maschinentheorie eine neue chemo-dynamische entgegenstellt. Er vertritt die Ansicht, daß der Körper die Fähigkeit habe, chemische Energie ohne die Zwischenform der Wärme direkt in mechanische Arbeit zu verwandeln. Schreber[92]) beweist 1914 die Unmöglichkeit einer Wärmezwischenenergie: denn nach dem zweiten Wärmesatz müßte für einen Wirkungsgrad von 30% eine notwendige absolute Tem-

peratur von 443° (170°C) erreicht werden. Eine derartige Temperatur ist aber unvereinbar mit der Anwesenheit von Muskelproteinen, denn ihre Gerinnungstemperatur liegt bekanntlich bei etwa 50°C, bei welcher Temperatur die irreversible Wärmestarre des Muskels eintritt. Im gleichen Artikel wendet sich Schreber vor allem gegen die Berechnung des Reinnutzeffektes für den Menschen, in der Weise, daß man den Ruhe-Energieumsatz von dem Gesamtenergieaufwand subtrahiert. Er führt diese Methode rechnerisch am Beispiel einer Ölmaschine ad absurdum, indem er den Leerlauf = Ruhestoffwechsel setzt und dann beweist, daß der Mensch am vorteilhaftesten arbeitet, der nichts arbeitet. Denn die Annäherung an den Leerlauf ergibt einen Wirkungsgrad von 64,8%, während dieser bei zunehmender Arbeit bis auf 43,7% sinkt. Schreber kritisiert ferner die große Variationsmöglichkeit des Ruhe- bzw. Leerlaufwertes, für den einmal der Kalorienverbrauch bei Ruhelage eingesetzt wird, dann wieder der Energieverbrauch für das horizontale Gehen, wenn es sich um Berechnung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades für das Steigen handelt.

Auch für die Muskelberechnung empfiehlt Schreber die ursprüngliche Clausius' Formel (die Rohnutzeffektformel der Physiologen), und zwar in ihrer Zerlegung in Teilwirkungsgrade, wie es die Ingenieure zur genaueren Bestimmung der Orte großen Energieverlustes eingeführt haben. Schreber sagt: Wir verfolgen die Energie auf ihrem Wege durch die Maschine und bestimmen überall, wo wir bequem eine Teilung dieses Weges in zwei Strecken vornehmen können, das Verhältnis der durch die Grenze hindurchgehenden Energie zu der an sie herankommenden. Wir nennen es den Wirkungsgrad der Umwandlung an dieser Grenze. Auf Grund einer mathematischen Ableitung zeigt er dann, daß der Gesamtwirkungsgrad gleich ist dem Produkt aller Teilwirkungsgrade.

$\eta_w = \eta_k \cdot \eta \cdot \eta_i \cdot \eta_m$
η_k = Wg des Kessels
η = Theoretischer Wg
η_i = induzierter Wg (Bruchteil d. theoret. Wg)
η_m = mechan. Wg

häufig werden noch weitere Zerlegungen der einzelnen Wg vorgenommen:

$\eta_k = \eta_r \cdot \eta_{kw}$
η_r = Wg des Rostes
η_{kw} = Wg der Kesselwandung.

Andererseits sind auch Zusammenziehungen ohne weiteres möglich:

$$\eta \cdot \eta_i = \eta_v \text{ (thermischer Wg)}$$

Die Hauptgleichung würde für diese beiden Abänderungen lauten:

$$\eta_w = \eta_r \cdot \eta_{kw} \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

Schreber errechnet so für einen Arbeiter einen Wirkungsgrad von rd. 8%. Der mechanische Wirkungsgrad des isolierten Muskels beträgt bei ihm 20%. Demgegenüber stellt er die Dampfmaschine mit einem mechanischen Wirkungsgrad von 90—96%. Für diese weit vollkommenere Maschinenleistung findet er die reichlich allgemeine Begründung, daß die Maschine zum Zwecke der Nutzarbeit konstruiert sei, während Mensch und Tier ursprünglich zum bloßen Leben und zur Fortpflanzung geschaffen sei.

Die Teilwirkungsgradberechnung greift Atzler[93]) 1937 wieder auf und führt eine genaue Übertragung auf den belebten Motor durch. Die Analyse beginnt an der Stelle, wo das kontraktile Element des Muskels die aus den chemischen Umsetzungen stammende Energie in mechanische Energie verwandelt. Hills chemisch-thermische Untersuchungen ergaben für den oxydativen Erholungsprozeß die gleiche Wärmemenge, die bei der initialen Wärmebildung entsteht. Atzler bestimmt daraus den theoretischen Wirkungsgrad für das kontraktile Element (Verhältnis der theoretisch möglichen Maximalarbeit zu der gesamten in Freiheit gesetzten potentialen Energie):

$$\frac{W}{W + W} = 0{,}5 = 50\,\%$$

In Wirklichkeit tritt aber ein gewisser Energieverlust durch Formänderung auf, indem zunächst der viscöse Widerstand der Muskel-

faser überwunden werden muß. Für die einzelne Muskelfibrille gibt es nur den Zustand der Ruhe oder der maximalen Kontraktion. Bei einer submaximalen Kontraktion des ganzen Muskels beteiligt sich nur ein Teil der Fibrillen an der Kontraktion, während die übrigen passiv mitgeschleift werden. Begreiflicherweise bedeutet dies eine große Mehrbelastung der aktiven Fibrillen. Je mehr Fibrillen also passiv mitbewegt werden müssen, um so unökonomischer arbeitet der Gesamtmuskel. Wir sehen somit, daß die Größe des Wirkungsgrades des Muskels von der Menge seiner am Kontraktionsakt beteiligten Fibrillen abhängt. Atzler bestimmt den Wirkungsgrad des isoliert gedachten Muskels:

$$\eta_m = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

In dieser Gleichung ist:

η_1 = theoret. Wg (50%)
η_2 = Wg an der Fibrillengrenze
η_3 = Wg an der Muskelgrenze (bei max. Kontraktion = 100%)

Den Wert für η_m kalkuliert Atzler auf Grund der Versuchsergebnisse mit 33,5%.
Die Werte in obige Gleichung eingesetzt ergibt:

$$0{,}3 = 0{,}5 \cdot \eta_2 \cdot 1{,}0$$
$$\eta_2 = 0{,}6$$

Betrachten wir nunmehr den Muskel unter natürlichen Verhältnissen, so verschlechtert sich sein Wirkungsgrad dadurch, daß bei Bewegung der Skeletteile gegeneinander Energie zur Überwindung der Reibung verbraucht wird. Der hieraus resultierende Teilwirkungsgrad η_4 ist etwas höher als 0,9. Der Energieverlust ist also nicht sehr groß.

Eine viel größere Energiemenge geht dadurch verloren, daß bei jeder Arbeit einzelne Skeletteile so gegeneinander versteift und fixiert werden müssen, daß der Körper in den Zustand der günstigsten Arbeitsstellung gebracht wird. Dazu kommt noch der Energieaufwand für die Balanzierarbeit. Diesen Energieverlust suchen wir mit η_5 zu erfassen.

Als letzten Teilwirkungsgrad führen wir η_6 ein. Er stellt die Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades durch die Mitbewegung körpereigener Last dar. Also ergibt sich für den Muskel im Organismus:

$$\eta_w = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6$$

Einen im Sinne der Wirkungsgraddefinition revolutionären Vortrag hält Professor Kaup[94]) München 1938 auf der I. Wissenschaftlichen Tagung der Deutschen Gesellschaft für Hygiene. Er sagt u. a.: Alle Nutzeffekt- oder Wirkungsgradberechnungen für menschliche Arbeitsleistungen sind auf eine völlig neue Grundlage zu stellen. Die neue Berechnung soll eine Beurteilung der Zustandsform des Organismus bei Durchführung abgestufter Arbeitsleistung sein. Der Nutzeffekt (Wirkungsgrad) des lebenden Ganzheitsystems einer ständigen Kern-Plasma-Grundpolarität kann nur aus dem Gleichgewicht und dem Verhältnis zwischen der Struktur und Funktion als der Konstitution des Systems einigermaßen richtig abgeschätzt werden. Die Maschinentheorie des Lebens und damit die einseitige kalorisch-oxydative Berechnung des Nutzeffektes mit und ohne sogenannte Leerarbeit sind überwunden. Mit der Teilung einer oxydativen und zelldynamischen Mehrleistung als Arbeitswirkung kann die alte thermo-dynamische Nutzeffektformel ohne Abzug eines Ruheleerlaufs in abgeänderter Form Verwendung finden. Die Änderung besteht in einer Verminderung des kalorischen Faktors von 5 auf 2,5 für den Ruhe-Normwert, wo Gleichgewicht von Isothermie und Isoionie besteht.

$$W = \frac{\text{mkg Arbeit} : 427 \text{ (Wärmeäquivalent)}}{O_2\text{-Verbr.} \cdot \mathbf{2{,}5} \text{ (kalor. Faktor)}}$$

Der Leerlauf als Lebensbedarf muß gerade der Ausgangspunkt für alle Berechnungen eines wirklichen Nutzeffektes sein. Von einem Norm-Nutzeffekt von 50% in der Ruhe ausgehend und unter Berücksichtigung des Wurzelwertes der Atemsteigerung oder der Steigerung der Kreislaufleistung (als Ganzheitswirkung einer Kapillar-, Herz-, Atemzusammenarbeit) im Abstand von den Ruhewerten ist jede individuelle Konstitutionskraft einfach zu beurteilen.

Diese Auffassung hat sich bisher noch keineswegs durchgesetzt. Verschiedene Punkte bedürfen noch einer näheren Erläuterung. Ihre Aufzählung dient hier der Vollständigkeit des Bildes.

Hill[95]) stellt 1928 folgende eigenartige Formel auf:

$$E = \frac{l - k \cdot (t - c)}{a \cdot (l + bt)}$$

E = Nutzeffekt
k = Viskositätsfaktor
t = Reizdauer
a = für Kontraktionsstärke 1 notwendige Energie
b = Erhaltungsfaktor
c = Kontraktionsdauer nach Reizbeendigung.

An Stelle näherer Ausführungen gebe ich die Beurteilung von Lienhardt[96]) in den Ergebnissen der Physiologie: „Das Ganze ist ein arithmetischer Zeitvertreib mit einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von Versuchsresultanten und einer im Verhältnis dazu imponierenden Anzahl gänzlich unbekannter, z. T. hypothetischer Größen." Dagegen wird die gleiche Formel 1939 von Atzler[97]) in seiner umfassenden Abhandlung über die Arbeitsphysiologie wieder zitiert und mit gewissen Einschränkungen für brauchbar erklärt.

Diese Beispiele zeigen klar, wie umstritten die Wirkungsgraddefinition auch heute noch ist. Vor 12 Jahren sprach Atzler bei seinen Bestimmungsmethoden von vorläufigen tastenden Versuchen. Vor einem Jahr schrieb er am Schluß seiner letzten theoretischen Betrachtung über den Wirkungsgrad der Arbeit: „Wenn sich bei diesen Berechnungen und Gedankengängen auch heute noch manche Lücken zeigen, so sehen wir doch, daß sich hier aussichtsreiche Wege eröffnen, die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Energieverbrauch und Arbeitsleistung formelmäßig zu erfassen."[97])

11. Schlußbetrachtung.

Der Wirkungsgrad des Muskels ist im Gegensatz zum Nutzeffekt der Maschine nur ein relativer, dessen Zahlenwert sich durch Aufstellung neuer Gesichtspunkte beliebig variieren läßt. Es gibt eben keinen Einheitsmuskel, der jede Arbeiteinheit — gleich welcher Qualität — mit demselben Energieaufwand verrichtet. Wir haben an Hand der verschiedensten Beispiele gesehen, in welcher Weise der Wirkungsgrad von folgenden bisher erkannten Faktoren abhängig ist:

1. Form, Größe und Anordnung der Fibrille
2. Kontraktionsgröße
   a) submaximale Kontraktion
   b) maximale Kontraktion
   c) zusätzliche Kontraktion von Synergisten
3. Kontraktionsdauer
4. Kontraktionsfolge (Arbeitstempo)
5. Reizqualität und -quantität
6. Anatomische Gegebenheiten
   a) Lagebeziehung zum Skelett
   b) Verhältnis von Synergisten und Antagonisten
7. Trainingszustand — Ermüdung
8. Individuelle Konstitution.

Als interessantes Spezialkapitel wäre noch die Wirkungsgradänderung unter dem Einfluß abnormer Bedingungen zu nennen. Hierzu wurde bereits die Bedeutung von Klima (Temperatur und Feuchtigkeit, Luftdruck und O_2-Gehalt), Diät, Adipositas und Schwangerschaft erwähnt. Pharmaka („leistungssteigernde", — Gifte), Krankheit, Alter, wie auch Lärm bilden weitere einflußreiche Wirkungsgradfaktoren.

Ungeklärt ist bis heute noch die Beziehung zwischen Ruhe- und Arbeitsstoffwechsel. Ein Beweis für die vorläufige Annahme einer Addition des Arbeitsenergieumsatzes zum Ruhestoffwechsel ist bisher keineswegs erbracht. Eine lückenlose Kette chemischer

Gleichungen, welche die Stoffwechselvorgänge im Muskel wiedergeben, ist ebenfalls noch unvollendet. Chemisch gekoppelte Strukturveränderungen rangieren als Hypothese. So ist also mit den bisher auf verschiedenen Wegen gefundenen Zahlen in entsprechender Weise weiter zu operieren.

Trotz gewisser Einschränkungen muß man doch feststellen, daß der Wirkungsgrad wie kaum ein anderer Indikator praktische Fingerzeige für die ökonomische Arbeitsleistung gibt, wenn man ihn klug benutzt. Es genügt keinesfalls für die verschiedenen Formen der Arbeitsgestaltung die Wirkungsgrade der Arbeit zu bestimmen und danach blindlings seine Dispositionen zu treffen. Man soll vielmehr neben dem Respirationsergebnis auch den Bewegungsablauf und die praktischen Erfahrungen in die Analyse mit einbeziehen. Erst dann, wenn man verstehen lernt, warum das energetische Optimum gerade bei einer bestimmten Form der Arbeitsgestaltung liegt, wird man den Sinn des Geschehens erfassen und aus dieser Erkenntnis heraus die allein richtige Anordnung zu treffen vermögen.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr. med. et phil. A. Hahn für die Anregung zu vorliegender Arbeit aufrichtig danken.

Literaturangaben.

Abkürzungen:

Arb.-Phys. = Zeitschrift: Arbeitsphysiologie.
„Energy-Transf." = „Energy-Transformation during horizontal walking" by Benedict and Murschhauser Carnegy Institution Public. 1915.
Erg.d.Phys. = Ergebnisse der Physiologie.
„K.u.A." = „Körper und Arbeit" Atzler, Leipzig, Thieme 1927.
„M.-W." = „Muscular Work" by Benedict and Cathcart, Carnegy Institution Public. 1913.
Pfl.A. = Pflügers Archiv der gesamten Physiologie.
Tigerst.Hb. = Tigerstedts Handbuch der physiologischen Methodik. Leipzig, Hirzel, 1911.
Z. = Zeitschrift.

1. P. u. V.: Z. f. Biolog. Bd. 2 S. 537, 1866.
2. F. u. W.: Myotherm. Untersuchg. 1889.
3. K.: Z. f. Biolog. Bd. 33 1896.
4. Sch.: American Journal of Phys. Bd. 22, 1908.
5. R.: Sitzgs.-Bericht d. Preuß. Akad. d. Wissensch. Bd. 16, 1910.
6. A.: „Arb.-Phys." Bd. 9 S. 582, 1937.
7. Steinhaus Chicago Vortrag s. d. Olympiade 1936 („Sporthochschulen d. Welt", Krümmel, Berlin, S. 175).
8. B. u. W.: Arch. f. Hyg. Bd. 26 S. 33, 1896; Bd. 39 S. 298, 1901.
9. Die mechan. Wärmetheorie, Braunschweig 1876.
10. H.: Théorie méchanique de la chaleur Bd. 1, Paris 1865.
11. R.: Sitzgs.-Ber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. Phys. math. Kl. S. 388, 1926.
12. Faksimile: Grimaux „Lavoisier".
13. Pettenkofer: Resp. App. Schema: „K.u.A." S. 171.
14. Tafel u. Beschr.: Biochem. Z. Bd. 14 S. 361—386, 1908.
15. Mundstückschema: „K.u.A." S. 172.
16. K. u. R.: Prakt. d. phys. Chem. Bd. 3, Berlin 1928.
17. Beschr. u. Abb.: „K.u.A." S. 171.
18. A.: Handbuch d. Biochem. Arb.-Meth. F. Müller über Gasanalysen.
19. Tornister Resp. App.: Tigerst. Hb. Bd. 1 Abb. 3 S. 172.

20. K. u. M.: „Arb.-Phys." Bd. 11 Heft 2, 1940.
21. Benedict — Resp. App. Schema: „K. u. A." S. 175.
22. V.: Über d. Einfluß d. Muskelbewegg. auf d. Stoffw., Münden 1860.
23. Ch.: Le prolongement chez le sujet alimenté du processus ... Cinquantenaire de la Société de Biolog., Paris 1899.
24. Tretbahn: „Energy-Tranfs." S. 32.
25. Stationär gebremstes Fahrrad: „M.-W.", Titelbild.
26. Johansson Ergometer: Tigerst. Hb. Bd. 1 Abt. 3 S. 60.
27. Ergometer nach Zuntz: Tigerst. Hb. Bd. 1 Abt. 3 S. 59.
28. Kurbelergostat: „K. u. A." S. 431.
29. D.: „Mytherm. Untersuchg." S. 189.
30. B.: Pfl.A. Bd. 174 S. 320.
31. F.: Bd. 219 S. 514.
32. F.: Pfl.A. Bd. 225 S. 540.
33. S. u. H.: Pfl.A. Bd. 225 S. 498.
34. Tab.: Z.: Pfl.A. Bd. 83 S. 494, 1901.
35. S.: Pfl.A. Bd. 95 S. 158, 1903.
36. v. H.: Arch. f. Anat.-Phys. S. 340, 1888. Bois Reymond A.
37. W.: Tigerst. Physiol. d. Menschen S. 61.
38. Tab. v. B. u. M.: „Energy-Transf." S. 98.
39. Tab. v. L.: „Science of Nutrition" S. 331, London, Philadelphia 1923.
40. K.: Pfl.A. Bd. 49 S. 361.
41. B. u. R.: Biochem. Z. Bd. 63 S. 170.
42. Tab. v. B. u. M.: „Energy-Transf." S. 22—27.
43. B. u. R.: Biochem. Z. Bd. 65 S. 35.
44. Tab. v. B. u. R.: Biochem. Z. Bd. 65 S. 54/55.
45. M.: „Arb.-Phys." Bd. 10 S. 515.
46. Z. Müller u. Casp.: „Höhenklima u. Bergwanderung ..." Denkschr. d. kaiserl. Akad., math.-nat. Kl., Wien 1909.
47. D.: Physiol. Ergebn.
48. H.: Arb.-Phys. Bd. 7.
49. B.: Bois-Reymond Arch. S. 509, 1900.
50. Lehmann: Arb.-Phys. Bd. 6 S. 282 u. Erg. d. Phys. Bd. 41 S. 221.
51. Tab. v. A. u. B.: „M.-W." S. 107.
52. Tab. v. B. u. C.: „M.-W." S. 108.
53. B., D. u. Z.: Bois Reymond Arch. Suppl. S. 20, 1904.
54. Graph. Darstellg. „M.-W." S. 138/39.
55. Graph. Darstellg.: Bois Reymond Arch. Suppl. S. 42.
56. Graph. Darstellg.: Bois Reymond Arch. Suppl. S. 44.
57. 2 Abb. hierzu: Bois Reymond Arch. Suppl. S. 48, 1904.
58. G. u. L.: Arb.-Phys. Bd. 9 S. 619.
59. Arb.-Phys. Bd. 10 S. 1.